

GRUNDLAGEN ZUR OBJEKTIVEN ERMITTLUNG  
EINES BODENLUFTDRUCKFELDES  
FÜR EIN BEGRENZTES GEBIET (OSTSEE)

Freie wissenschaftliche Arbeit  
zur Erlangung des Grades  
eines Diplommeteorologen  
des Fachbereichs Mathematik-Naturwissenschaften  
der  
Christian-Albrechts-Universität  
zu Kiel

vorgelegt von Heinrich Liebing

DOI 10.3289/IFM-BER-24

Kiel  
1976

Berichte  
aus dem  
Institut für Meereskunde  
an der  
Christian-Albrechts-Universität Kiel  
Nr. 24

PRINCIPLES OF OBJECTIVE ANALYSIS  
OF SURFACE PRESSURE FIELDS  
OF A LIMITED REGION (BALTIC SEA)

Requesters may obtain copies of this report from

Heinrich Liebing  
Institut für Meereskunde  
Abt. Maritime Meteorologie  
Düsternbrooker Weg 20  
D 2300 K i e l 1

## UEBERSICHT

Um die Einwirkungen der Atmosphäre auf ozeanographische Bewegungsvorgänge zu berücksichtigen, wird in ozeanographischen Mehrschichtenmodellrechnungen unter anderem als Eingabeparameter die meteorologische Schubspannung verwendet, die durch den Wind an der Meeresoberfläche wirksam wird. Das Windfeld läßt sich dabei unter verschiedenen Annahmen aus dem Bodenluftdruckfeld bestimmen. Die Bodenluftdruckwerte liegen dabei an den konventionellen synoptischen Stationen vor, aus denen dann z.B. im Deutschen Wetterdienst Gitterwerte eines grobmaschigen Netzes (Gitterabstand in der Größenordnung von einigen hundert Kilometern) objektiv analysiert werden. Um aber auch kleinräumige Isobarenstrukturen - z.B. in Frontnähe - noch erfassen zu können, sind in dieser Arbeit Bodenluftdruckwerte für ein engmaschigeres Gitternetz erstellt worden. Dabei beträgt der mittlere Gitterpunktabstand 47,5 km, der aber auf Grund des benutzten Verfahrens noch verkleinert werden kann. Dieses Gitternetz überdeckt das gesamte Gebiet der Ostsee und kann daher für die im Zusammenhang mit der Expedition BALTIC 75 (April/Mai 1975) angestellten Untersuchungen benutzt werden. Die Berechnung der engmaschigen Gitterwerte geschah hier durch eine bikubische Interpolation. Als Ausgangsdaten wurden die oben erwähnten, durch ein modifiziertes Analysenprogramm des Deutschen Wetterdienstes an einem grobmaschigen Gitternetz hergestellten Bodenluftdruckwerte benutzt; dieses Gitternetz hat eine mittlere Maschenweite von 190 km. Zusätzlich wurden neue meteorologische Informationen berücksichtigt.

## PREFACE

In order to account for the influence of the atmosphere on oceanographic motion systems, the meteorological shearing stress has been used, besides others as an input into an oceanographic multi-layer model. The stress caused by the wind acts on the sea surface. The surface wind field can be determined under different assumptions from the surface pressure field. Surface pressure values are thereby obtained from the conventional synoptic stations and by use of these data grid point values can be analysed objectively for a wide-meshed net (distance of the order of a few hundred kilometers) for instance by the Deutscher Wetterdienst. In this paper surface pressure values have been obtained for a much smaller spaced grid-net, in order to take care of smaller scale isobaric features for example in the vicinity of fronts. Thereby the mean grid distance is about 47,5 km. However on the basis of the procedure used this distance can be made still smaller. The special network overlays the total area of the Baltic Sea and can thus be used in connection with investigations carried out with data collected during the expedition BALTIC 75 (April/May 1975). The procedure to obtain the smaller scale grid values is based upon bicubic polynoms. The initial data are the above mentioned surface pressure values, computed by the Deutscher Wetterdienst, applying a modified analysis-program (mean grid-point distance about 190 km). In addition further meteorological informations have been taken into account.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Die objektive Analyse	5
2.1. Die amerikanische Methode	6
2.2. Die schwedische Methode	7
2.3. Die Methode GANDIN	8
3. Die Erstellung der DWD-Gitterwerte	9
3.1. Die stereographische Projektion	10
3.2. Das Korrektionsverfahren des Deutschen Wetterdienstes	16
3.2.1. Die benutzten synoptischen Daten	19
3.2.2. Die Anfangsnäherung	20
3.2.3. Die benutzte Glättung	21
4. Interpolation auf das Kieler Gitter	24
4.1. Die Einteilung für das Kieler Gitternetz	26
4.2. Die bikubische Interpolation	27
5. Überprüfung der Interpolationsergebnisse	34
5.1. Überprüfung der synoptischen Meldungen	34
5.2. Direkte Vergleichsprüfung	35
5.3. Bedeutung der Differenzen	36
6. Abwandlung der DWD-Gitterwerte	40
6.1. Die bilineare Methode	41
6.2. Die bikubische Methode	42
7. Zusammenfassende Ergebnisse im Vergleich der einzelnen Berechnungsmethoden	45
7.1. Überprüfung der Isobarenzeichnungen	47
7.2. Fehlerbetrachtung der Analysenergebnisse	55
8. Schlußbetrachtung	70
Anlage	72
Literaturverzeichnis	75

## 1. EINLEITUNG

Diese Diplomarbeit ist Teil der ozeanographischen und meteorologischen Untersuchungen der Expedition "BALTIC 75", die vom 1. April bis zum 26. Mai 1975 im Großgebiet um Bornholm und im Bornholmer Becken stattgefunden hat. Während dieser Zeit waren verschiedene meteorologische und ozeanographische Beobachtungsstationen errichtet und eingesetzt worden; die Verteilung und Art der für spezielle meteorologische Untersuchungen benutzten Stationen ist in Abb. 1 gezeigt.

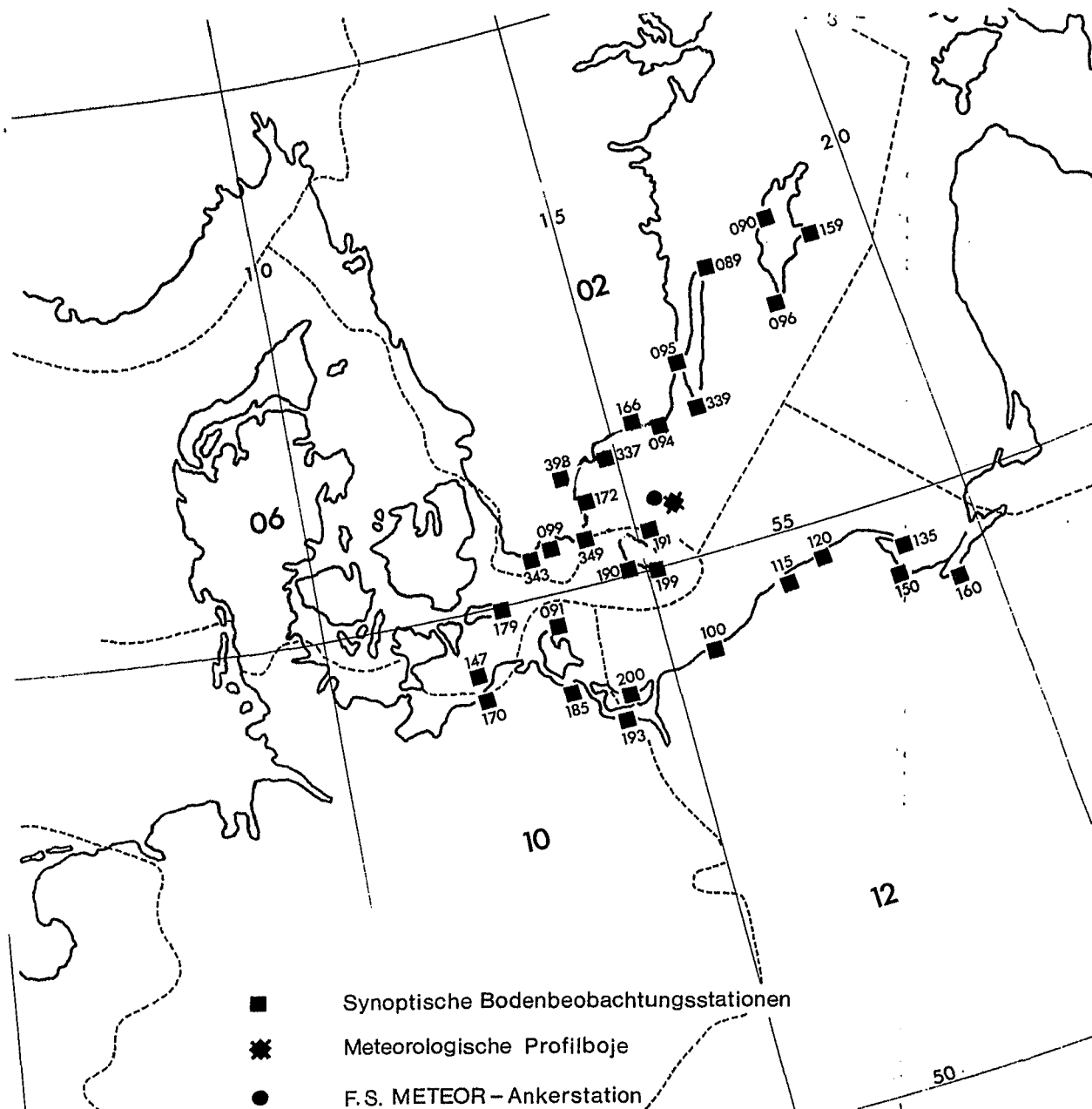


Abb. 1 zeigt die Art und Verteilung der für meteorologische Untersuchungen benutzten Meßstationen während des "BALTIC 75" Unternehmens

Das Ziel der meteorologischen Untersuchungen bestand darin, die Einwirkungen der Atmosphäre auf die Ostsee in ihren verschiedenen Größenskalen zu untersuchen. Dadurch soll es möglich werden, meteorologische Parameter bestimmen zu können, die in ozeanographischen Modellrechnungen als Eingabe verwendet werden. Am Institut für Meereskunde in Kiel wird an einem baroklinen ozeanographischen Mehrschichtenmodell für die Ostsee gearbeitet. Als meteorologische Eingabe geht in diesem Modell unter anderem die Schubspannung ein, die durch den Wind an der Meeresoberfläche angreift. Eine Änderung des Windes bewirkt somit eine Änderung der Richtung und Stärke der Schubspannung. Für die Berechnung der Schubspannung seien in diesem Zusammenhang zwei Möglichkeiten aufgeführt:

1. Eine empirische Form der Berechnung, wobei die aktuelle Windgeschwindigkeit  $U_{10}$  in 10 Meter Höhe (Anemoternniveau) gemessen wird. Dann läßt sich die Schubspannung  $\tau$  berechnen aus

$$|\vec{\tau}| = \rho \cdot c_d \cdot U_{10}^2$$

$\rho$  : Dichte

$c_d$  : Schubspannungskoeffizient

$U_{10}$  : Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe

2. In der zweiten hier aufgeführten Möglichkeit, die Schubspannung zu berechnen, geht der geostrophische Wind in die Berechnung ein:

$$|\vec{\tau}| = \rho \cdot c_g \cdot v_g^2$$

$v_g$  : geostrophischer Wind

$c_g$  : geostrophischer Schubspannungskoeffizient

Dabei ist  $\tau$  als Vektor zu verstehen, dessen Richtung durch den Ablenkungswinkel  $\alpha$  und die Richtung des geostrophischen Windes  $v_g$  bestimmt wird.

$$\text{Richtung } \vec{\tau} = \text{Richtung } (\vec{v}_g) - \alpha$$

Dabei ist  $\alpha$  der Ablenkungswinkel zwischen wahren und geostrophischen Wind (positiv bei einer Ablenkung zum tiefen Druck).

Voraussetzung für die Berechnung des Schubspannungsfeldes ist also entweder die Kenntnis des wahren Windfeldes und des Schubspannungskoeffizienten  $c_d$  (erste Möglichkeit) oder des geostrophischen Windfeldes und des geostrophischen Schubspannungskoeffizienten  $c_g$  sowie des Ablenkungswinkels  $\alpha$  (zweite Möglichkeit). Da der geostrophische Wind über See im allgemeinen besser bekannt ist als der wahre Wind über See, hat die zweite Berechnungsmöglichkeit für die Schubspannung einige Vorteile. Am Institut für Meereskunde in Kiel werden im Rahmen einer Diplomarbeit von J. BEHRENDT (1976) Methoden zur Bestimmung der Koeffizienten  $c_g$  und  $\alpha$  erarbeitet.

Ist das Bodenluftdruckfeld möglichst exakt bekannt, so kann das wahre Windfeld in einer ersten Näherung durch das geostrophische Windfeld bestimmt werden. In einer weiteren Untersuchung ist es dann auch möglich, den Ablenkungswinkel  $\alpha$  zwischen geostrophischem und wahren Wind zu berechnen. Der Schubspannungskoeffizient  $c_g$  ist ein Maß für den Unterschied zwischen der Stärke des geostrophischen und des wahren Windes. In dieser Arbeit wird für die Ausgangsdaten solcher Untersuchungen ein Druckfeld im Gebiet der Ostsee erstellt, wobei die Bodenluftdruckwerte an Gitterpunkten eines engmaschigen Gitternetzes berechnet werden. Die Erstellung dieser Gitterwerte erfolgt nach den Methoden der objektiven Analyse. In Abschnitt 2 wird dazu eine allgemeine Beschreibung von Methoden der objektiven Analyse zur Erstellung von Gitterwerten gegeben. Mit einer dieser Methoden sind die Gitterwerte während des Zeitraumes des "BALTIC 75" - Unternehmens in einem abgeänderten Analyseverfahren des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach berechnet worden. Die dabei benutzte Korrektionsmethode ist in Abschnitt 3 beschrieben. Für den erweiterten Ostseebereich (siehe Abb. 5) wurden dann aus den Analysendaten des Deutschen Wetterdienstes engmaschigere Gitterwerte erstellt. Dem dazugehörigen Gitternetz wird im folgenden der Name "Kieler Gitternetz" zugeordnet. Dieses Kieler Gitternetz hat einen mittleren Gitterpunktsabstand von nur 47,5 km.



Die genaue Beschreibung des Kieler Gitternetzes erfolgt in Abschnitt 4. Für eine erste Berechnung der Kieler Gitterwerte wurde ein rein mathematisches Interpolationsverfahren angewendet, das in Abschnitt 4.2. beschrieben ist. Die Ergebnisse dieser Interpolation konnten mit Hilfe von synoptischen Stationsmeldungen überprüft werden. Die Überprüfungsmethode und die erhaltenen Ergebnisse sind in Abschnitt 5 beschrieben. An dieser Stelle soll nur kurz bemerkt werden, daß sich bei der Überprüfung herausstellte, daß in größeren Gebieten die errechneten Druckwerte an den synoptischen Stationen von den dort gemeldeten aktuellen Druckwerten abwichen. Man kann jedoch davon ausgehen, daß innerhalb vertretbarer Meßungenauigkeiten die gemeldeten Druckwerte dieser Stationen nicht falsch sind, sondern eher die Ausgangsdaten des DWD-Gitters nicht exakt genug für die benutzte Interpolationsform waren. Es erschien so sinnvoll, diese DWD-Basisdaten auf der Grundlage zusätzlicher Informationen zu ändern. Dazu wurden zwei verschiedene Wege beschritten. Die Verfahren, mit denen dabei die DWD-Gitterwerte abgewandelt werden, sind in Abschnitt 6 beschrieben. Nach der vollzogenen Änderung werden mit dem in Abschnitt 5 beschriebenen Überprüfungsmodus mit Hilfe der synoptischen Meldungen die abgewandelten Druckfelder untersucht, der mittlere quadratische Fehler bestimmt und die resultierenden Veränderungen beschrieben. Zusammenfassende Ergebnisse darüber liegen in Abschnitt 7 vor. Die nach der Abwandlung der DWD-Gitterwerte errechneten Gitterwerte im Kieler Gitternetz können nun zusammen mit den synoptischen Stationsmeldungen von den Stationen im Bornholmgebiet den Ausgangssatzen bilden für die Berechnung des geostrophischen Windes  $v_g$ . Mit den oben beschriebenen Methoden kann dann die Schubspannung  $\tau$  berechnet werden. Im letzten Teil dieser Arbeit wird in Abschnitt 7 für einige extremen Wetterlagen die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Analysen diskutiert, die aus den Kieler Gitterwerten erstellt wird. Dabei werden Fehlerbetrachtungen vorgenommen, um das Verhalten der Analyse bei stark zyklonalen und antizyklonalen Wettersituationen beurteilen zu können.

## 2. DIE OBJEKTIVE ANALYSE

Durch die Entwicklung immer größerer und besserer Datenverarbeitungsanlagen ist es heute möglich geworden, eine objektive und numerische Analyse von meteorologischen Feldern erstellen zu können. Dabei wird versucht, die derzeit exakteste Darstellung der "tatsächlichen" meteorologischen Verhältnisse objektiv errechnen und beschreiben zu können. Da die Ergebnisse der Berechnungen weitgehend von der Dichte des benutzten Stationsnetzes abhängen, also von der Anzahl der zur Verfügung stehenden meteorologischen Werte, war es jedoch nicht möglich, eine "absolut" objektive Analyse mit den bisher benutzten Rechenmodellen erstellen zu können. Zwar konnte durch die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit und durch Kapazitätserweiterungen der Computer das Ergebnis wesentlich verbessert werden, jedoch läßt sich prinzipiell ein Mangel an Daten in stationsarmen Gebieten nur ungenügend ausgleichen. Dadurch tritt speziell bei einigen Rechenverfahren eine Ungenauigkeit der erstellten Analyse in datenleeren Gebieten auf. Gerade in Rechenverfahren, die nach der Korrektionsmethode arbeiten, ist dies der Fall. Den Anfangswerten ("first guess") kommt bei dieser Methode eine starke Bedeutung zu. Die Anfangswerte sind z.B. vorgegebene Gitterpunktswerte vor dem Beginn einer feldmäßigen Analyse. Sie enthalten also keine aktuellen Informationen. Die eigentliche aktuelle meteorologische Information wird von den tatsächlichen Meßstationen auf die Gitterwerte interpoliert. Die Gitterwerte werden dann mit den Meldungen entsprechend korrigiert. Mit einer solchen Korrektionsmethode sind auch die Gitterwerte des hier benutzten DWD-Gitters erstellt worden (siehe hierzu Abschnitt 2.1.).

In den letzten fünfundzwanzig Jahren sind große Anstrengungen unternommen worden, um Verfahren zu entwickeln, mit denen eine möglichst exakte Analyse erstellt werden kann. Unter dem Begriff "OBJEKTIVE ANALYSIS" sind diese Unter-

suchungen in die Meteorologie eingegangen. L.S. GANDIN (1963) versteht unter dem Begriff "objektive analysis" eine "Realisierung von Methoden, die es ermöglichen, aus den Meßdaten meteorologischer Stationen Felder der meteorologischen Variablen zu konstruieren oder ihre Werte an beliebigen Punkten eines Gitternetzes zu erhalten". Drei Hauptschritte müssen für die Verwirklichung dieser Zielsetzung unternommen werden:

1. Im gesamten zu analysierenden Datensatz (Stationsmeldungen) müssen Falschmeldungen eliminiert und korrigiert werden;
2. Die dann vorhandenen Daten müssen auf ein vorgegebenes Gitter interpoliert werden,
3. Die so berechneten Gitterwerte müssen geglättet werden, um Diskontinuitäten und evtl. rechnerische Ungenauigkeiten ("noise") zu vermeiden.

Welche Wege hat man nun bisher beschritten, um dem Ziel, eine objektive Analyse erstellen zu können, näher zu kommen? In einer zusammenfassenden Darstellung beschreiben S.L. BELOUSOV, L.S. GANDIN und S.A. MASHKOVICH (1968) die bisher erstellten Analysenmethoden. Man kann dabei drei grundsätzlich verschiedene Verfahren unterscheiden:

### *2.1. Die amerikanische Methode*

B. GILCHRIST und G.P. CRESSMAN (1954) entwickelten eine der ersten benutzbaren Techniken für objektive Analysen. Die Berechnungsmethode beruht auf einer Approximation des meteorologischen Feldes durch Polynome. Dabei verwenden die Autoren ein Polynom dritten Grades, wobei nach der Methode der kleinsten Quadrate die meteorologischen Daten an Gitterwerte angepaßt werden. Dies geschieht in einem abgegrenzten Gebiet um einen Gitterpunkt herum. Winddaten werden bei der Analyse mit berücksichtigt, indem geostrophische Verhältnisse angenommen werden. Dadurch kann der Gradient der geopotentiellen Höhe bestimmt werden, wobei

die Abweichung der Höhe einer Druckfläche von der Standardatmosphäre an einem Gitterpunkt berechnet wird. In Gebieten mit wenigen Stationsmeldungen sind die Analysenergebnisse dieser Methode nicht überzeugend. Das findet seine Ursache in der Polynomapproximation, denn bei einem vorgegebenen Freiheitsgrad des Polynoms muß die Anzahl der benutzten Stationen mindestens der Zahl der Freiheitsgrade entsprechen. Dies ist in datenleeren Gebieten nicht der Fall. Spezielle Untersuchungen dazu und über das Verhalten verschiedener Polynome bei einer vorgegebenen Stationsverteilung wurden von A.A. PETROV (1968) vorgenommen.

## *2.2. Die schwedische Methode (Korrektionsmethode)*

Auf diesem Verfahren beruht die Korrektionsmethode.

P. BERGTHORSSON und B.R. DOÖS (1955) entwickelten als erste diese Analysenmethode. Sie gingen in ihren Berechnungen von einem Anfangsfeld ("preliminary field") aus. Die Werte dieses Anfangsfeldes waren gewichtete Mittelwerte. Die Mittelung bestand dabei aus:

- a) Werten der Vorhersage an den Gitterpunkten, erstellt aus Vorhersagemodellen und
- b) klimatologischen Mitteln am Ort des Gitterpunktes.

Eine Wichtung steuert dabei die verschieden starke Berücksichtigung von a) und b). Die so entstandenen Werte an den Gitterpunkten werden dann durch die aktuellen Daten in mehreren Rechendurchgängen korrigiert. Diese noch zu beschreibende Korrektion wird für alle Gitterpunkte vorgenommen. Bei jeder Korrektur für den einzelnen Gitterpunkt wird eine Wichtung berücksichtigt, in die die Entfernung Gitterpunkt / Meßstation eingeht. Das stärkste Gewicht erhält dabei die Meldung mit dem geringsten Abstand Gitterpunkt / Meßstation. Pro Rechendurchgang werden alle Gitterpunkte korrigiert. Werden mehrere Rechendurchgänge hintereinander durchlaufen, so wird der Einflußradius um einen Gitterpunkt erhöht, damit immer mehr Details des meteorologischen Feldes berücksichtigt werden können. Es

beeinflussen so immer mehr Stationen einen Gitterwert. Die erhaltenen Ergebnisse waren durchaus für die Vorhersage und Analyse benutzbar. Schwierigkeiten bei dieser Methode stellen sich jedoch dort ein, wo die meteorologischen Felder in Gebieten berechnet werden sollen, in denen keine Stationsmeldungen vorhanden sind, denn für diese Gebiete kann die Korrektur der vorgegebenen Gitterwerte nicht ausgeführt werden. Das Gesamtergebnis der Analyse ist daher stark abhängig von der Genauigkeit der vorgegebenen Gitterwerte.

G.P. CRESSMAN erstellte dann 1959 eine Modifikation dieser Korrekturmethode, indem er als Ausgangsfeld nur die Vorhersagewerte für den Zeitpunkt benutzte, für den die Analyse errechnet werden sollte. Korrigiert und gewichtet wurde dann auf die gleiche Art wie in der Methode von Bergthorsson und Doös.

### *2.3. Die Methode Gandin*

Dies ist eine Methode der "optimalen Interpolation". Dabei werden die Werte der meteorologischen Variablen an den Gitterpunkten nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den gemeldeten Stationswerten bestimmt. Korrelationsfunktionen und statistische Kriterien werden dabei berücksichtigt. Es sei hier auf die genaue Beschreibung von L.S. GANDIN (1965) hingewiesen. Diese Methode wird hauptsächlich in der Sowjetunion angewendet. Auch in datenleeren Gebieten können mit dieser Methode zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

In der zurückliegenden Zeit sind viele Modifikationen an den drei Methoden vorgenommen worden. Noch heute basieren vorwiegend in westlich orientierten Ländern die Grundlagen der Analysenverfahren auf der "amerikanischen" und "schwedischen" Methode. Die modifizierten Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich in den Details der Berechnungen und in der Hinzufügung von zusätzlichen Informationen. Zum Teil

werden auch die Analysen der verschiedenen geopotentiellen Höhen miteinander verknüpft, um eine vertikale Konsistenz zu gewährleisten. Speziell für die Berechnungen der einzelnen Geopotentialflächen wurden verbesserte Verfahren erstellt. Trotz aller bisherigen Bemühungen ist die objektive Analyse noch immer von willkürlichen Annahmen abhängig. Die Prämissen der Berechnungen können also von Methode zu Methode variiert werden und allein dadurch zu anderen Resultaten führen. So kann z.B. eine unterschiedlich stark vorgenommene Wichtung von Wind und Höhendaten ebenso die Resultate der Berechnungen ändern, wie dies durch die Änderung des Grades eines Polynoms oder die Änderung der vorgegebenen Stationsverteilung die Folge sein wird. Genauere Untersuchungen über die Beeinflussung der Analyse durch die Benutzung verschiedener Polynome im Zusammenhang mit einer vorgegebenen Stationsverteilung liegen von A.A. PETROV (1968) vor.

Nach dieser kurzen Einleitung in das Gebiet der objektiven Analyse soll die Methode exakt beschrieben werden, mit der für diese Arbeit die Ausgangsdaten beim Deutschen Wetterdienst berechnet worden sind.

### 3. ERSTELLUNG DER DWD - GITTERWERTE

Die Berechnung der meteorologischen Parameter an den Gitterpunkten erfolgte durch ein modifiziertes Routineprogramm des Deutschen Wetterdienstes. Dieses Programm arbeitet nach einem Korrektionsverfahren. Im Original wird es zur täglichen Analyse im Wetterdienst benutzt. Gegenüber dem Routineprogramm wies das benutzte Analysenprogramm folgende Änderungen auf:

- a) Es wurden nur Bodenwerte berechnet. Eine Koppelung an die darüber liegenden Geopotentialflächen fand nicht statt, somit wurde die vertikale Konsistenz nicht überprüft.
- b) Das Analysegebiet wurde verkleinert, da sowohl die Rechenzeit als auch der Speicherplatz bei der hier angewandten Berechnung für das ursprüngliche Gebiet zu groß geworden wären, denn
- c) der mittlere Gitterpunktsabstand wurde halbiert und beträgt nun in 60°N 190 km anstelle von 380 km.



Im Fall der hier vom DWD benutzten stereographischen Projektion liegt die Projektionsebene parallel zur Äquatorebene in der geographischen Breite  $\phi_0 = \frac{\pi}{3} = 60^\circ \text{N}$ . Der Radius  $r_0$  dieses Breitenkreises läßt sich in folgender Weise angeben:

$$\tan \frac{\alpha_0}{2} = \frac{r_0}{A_0 + x} \quad \text{mit } \alpha_0 = 90 - \phi_0$$

Für den Radius  $r$  der Projektion eines beliebigen Breitenkreises mit der geographischen Breite  $\phi$  und dem Polabstand  $\alpha = 90 - \phi$  erhält man:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{r}{A_0 + x}$$

$A_0$  : Erdradius  
 $x$  : Abstand Projektionsebene vom Kugelmittelpunkt

$$\text{Daraus folgt: } \frac{r}{r_0} = \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{\tan \frac{\alpha_0}{2}}$$

$$\text{oder} \quad r = \frac{r_0}{\tan \frac{\alpha_0}{2}} \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$$

Setzt man nun für  $\alpha$  den Wert  $90^\circ$  ein, so erhält man für die kreisförmige Abbildung des Äquators den Radius

$$A = \frac{r_0}{\tan \frac{\alpha_0}{2}}$$

$$\text{Somit gilt dann also : } r = A \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

Da aber auf Grund des Strahlensatzes  $A = A_0 + x$  ist und weiter  $x = A_0 \cdot \cos \alpha_0$  gilt, folgt  $A_0 \cdot \cos (90 - \phi_0) = A_0 \cdot \sin \phi_0$

$$\text{Damit wird } A = A_0 (1 + \sin \phi_0) \quad (2)$$

So ergibt sich für den Radius  $r$  der Projektion eines Breitenkreises der geographischen Breite  $\phi$  auf der Projektionsebene aus den Formeln (1) und (2)

$$r = A_0 (1 + \sin \phi_0) \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$



Während auf der Kugeloberfläche der Abstand Pol - Breitenkreis bei wachsendem Polabstand mit  $A_0 \cdot \arctan \alpha$  variiert, ändert sich derselbe Abstand auf der Projektionsebene entsprechend dem  $\tan \frac{\alpha}{2}$ . Es kommt also zu einer Verzerrung von Strecken bei der Abbildung. Die einzige Strecke, die in ihrer wahren Länge abgebildet wird, ist der Umfang des Breitenkreises, in dem die Projektionsebene die Kugel schneidet.

Als Verzerrungsfaktor  $m$  bezeichnet man das Verhältnis zwischen der Änderung der Entfernung bezüglich der Poldistanz auf der Projektionsebene zu der entsprechenden Änderung auf der Kugeloberfläche. Bezeichnet man das zur Zenitdistanz gehörende Meridianstück auf der Kugeloberfläche mit  $a = A_0 \cdot \arctan \alpha$ , so gilt also für den Verzerrungsfaktor  $m_\phi$  in Richtung des Meridians

$$m_\phi = \frac{\frac{dr}{d\alpha}}{\frac{da}{d\alpha}}$$

Aus (1) erhält man dann mit  $r = A \cdot \tan \frac{\alpha}{2}$

$$m_\phi = \frac{\frac{d}{d\alpha} A \cdot \tan \frac{\alpha}{2}}{\frac{d}{d\alpha} A_0 \cdot \arctan \alpha} = \frac{A}{A_0} \frac{d}{d\alpha} \tan \frac{\alpha}{2}$$

Setzt man  $\frac{\alpha}{2} = \beta$  so folgt

$$\begin{aligned} m_\phi &= \frac{A}{A_0} \frac{1}{2} \frac{d}{d\beta} \tan \beta \\ &= \frac{A}{A_0} \frac{1}{2} \frac{1}{\cos^2 \beta} \\ &= \frac{A}{A_0} \frac{1}{2} \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} \end{aligned}$$

Mit der Umformung  $2 \cos^2 x = 1 + \cos 2x$  folgt dann

$$m_\phi = \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \cos \alpha} = \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \cos (90^\circ - \phi)} = \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \sin \phi}$$

Mit Gleichung (2) ergibt sich somit

$$m_\phi = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 + \sin \phi}$$

In Richtung des Breitenkreises gilt: wird der Radius des Breitenkreises auf der Kugel mit dem Polabstand  $\alpha$  mit  $r'$  benannt, so ist die zu dem Azimut gehörende Strecke  $b$  auf dem Breitenkreis definiert durch  $b = r' \cdot \lambda$ . Da aber  $r' = A_0 \cdot \sin \alpha$  gilt, folgt somit  $b = A_0 \cdot \sin \alpha \cdot \lambda$ .

Für den Verzerrungsfaktor des Breitenkreises gilt somit:

$$m_\lambda = \frac{\frac{db'}{d\lambda}}{\frac{db}{d\lambda}} = \frac{\frac{d}{d\lambda} A \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \lambda}{\frac{d}{d\lambda} A_0 \sin \alpha \cdot \lambda} = \frac{A \tan \frac{\alpha}{2}}{A_0 \sin \alpha}$$

$$= \frac{A \sin \frac{\alpha}{2}}{A_0 \sin \alpha \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}$$

Mit  $\sin x = 2 \sin \frac{x}{2} \cdot \cos \frac{x}{2}$  folgt daraus

$$m_\lambda = \frac{A}{A_0} \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}$$

Durch die Umformung  $2 \cos^2 x = 1 + \cos 2x$  ergibt sich

$$m_\lambda = \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \cos \alpha} \cdot \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \cos(90^\circ - \phi)} = \frac{A}{A_0} \frac{1}{1 + \sin \phi}$$

Da weiterhin mit Gleichung (2) gilt

$$A = A_0 (1 + \sin \phi_0) \text{ kann } m_\lambda \text{ folgendermaßen}$$

umgeformt werden

$$m_\lambda = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 + \sin \phi} \quad (4)$$

Daraus folgt  $m_\lambda = m_\phi = m$

Somit lassen sich die Verzerrungen bei der stereographischen Projektion unabhängig von der Richtung durch die Gleichung (4) bestimmen. Da im benutzten DWD-Gitternetz  $20^\circ < \phi < 90^\circ$  ist, kann der Verzerrungsfaktor  $m$  den Wert  $1,390 > m > 0,933$  annehmen.

Der wahre Gitterabstand in der geographischen Breite  $\phi$  berechnet sich somit aus dem Gitterabstand in  $60^\circ\text{N}$  (Projektionsebene), der  $190 \text{ km} = G$  beträgt, zu  $G \cdot m$ . Berücksichtigt man den vorgegebenen Gitterabstand  $G$ , so ändert sich die Gleichung (3) in folgender Form:

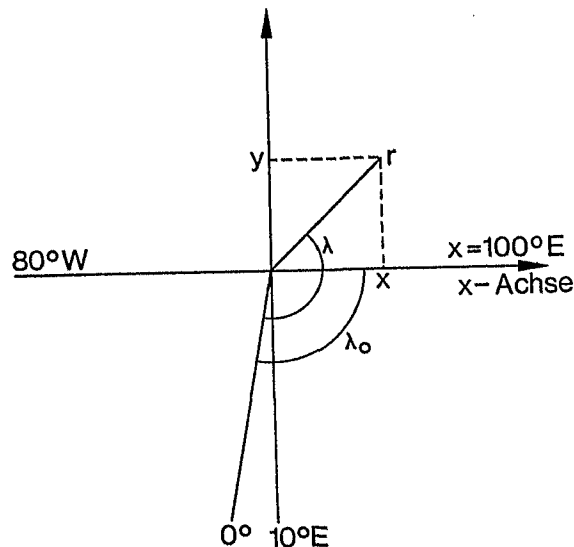
$$(5) \quad r = \frac{A_0 (1 + \sin \phi_0)}{G} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad \text{wobei } \alpha = 90 - \phi \text{ ist.}$$

Legt man in die Projektionsebene ein rechtwinkeliges Gitternetz, dessen Ordinate parallel zum Meridian  $10^\circ\text{E}$  verläuft, so erhält man für einen Gitterpunkt der geographischen Breite  $\phi$  und der geographischen Länge  $\lambda$  folgende rechtwinkelige Koordinaten:

$$(6) \quad x = r \cdot \cos \gamma \quad \text{wobei } \gamma = (\lambda - \lambda_0) \text{ ist mit}$$

$$\lambda_0 = \frac{5}{9} \pi \hat{=} 100^\circ \text{ und } \lambda = \text{geographische Länge}$$

$$(7) \quad y = r \cdot \sin \gamma$$



**Abb. 3** Zur Transformation von stereographischen in kartesische Koordinaten  
 $r$  : Radius des betrachteten Breitenkreises  
 $x$  : x-Koordinate des Gitternetzes  
 $y$  : y-Koordinate des Gitternetzes  
 $\lambda$  : geographische Länge  
 $\lambda_0$  :  $5/9 \pi$

Setzt man Gleichung (5) in Gleichung (6) und (7) ein und berücksichtigt, daß der Nullpunkt des Koordinatensystems gegenüber dem Pol um 16 Einheiten in negativer x-Richtung und um 36 Einheiten in negativer y-Richtung verschoben ist (siehe Abb. 4) lassen sich durch die Angabe von  $\phi$  und  $\lambda$  einer Meßstation der Abzissen- und Ordinatenwert im Gitternetz wie folgt berechnen:

$$(8) \quad x = \frac{A_o (1 + \sin \phi_o)}{G} \cdot \tan \frac{90 - \phi}{2} \cdot \cos (\lambda - \lambda_o) + x_p$$

$$(9) \quad y = \frac{A_o (1 + \sin \phi_o)}{G} \cdot \tan \frac{90 - \phi}{2} \cdot \sin (\lambda - \lambda_o) + y_p$$

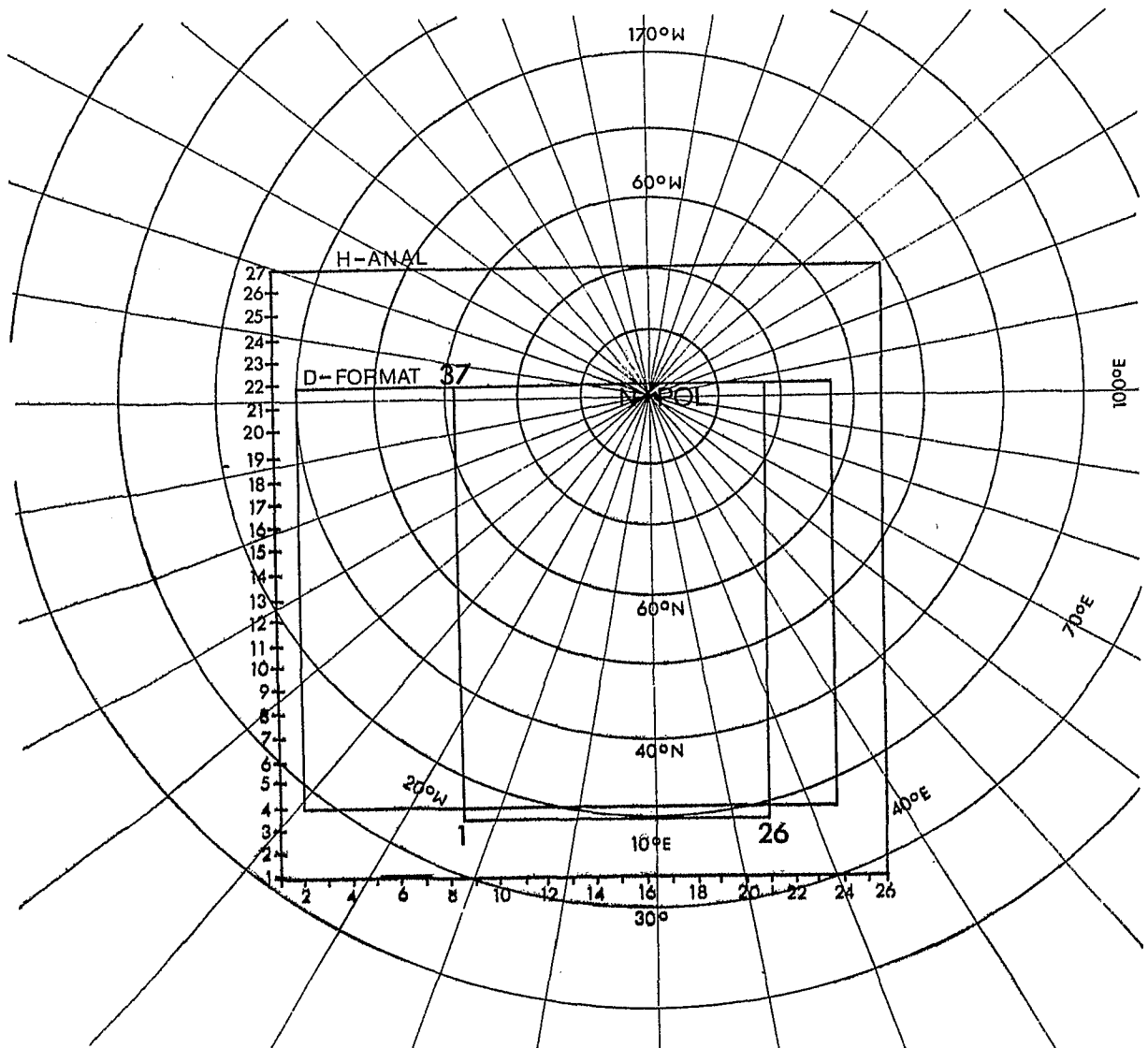


Abb. 4 Es sind die Grenzen der vom DWD benutzten Gitternetze eingetragen. Das für diese Arbeit modifizierte Gitternetz hat in x-Richtung 26 und in y-Richtung 37 Gitterpunkte. Es ist entstanden aus dem D-Format (Maßstab 1:15 Mill). Im H-Analysenformat erstellt der DWD ebenfalls Wetterkarten.

Dabei sind wie aus Abb. (4) ersichtlich,  $x_p$  und  $y_p$  die Gitterkoordinaten des Pols mit  $x_p = 16$  und  $y_p = 36$ . Die Gitterpunkte des Gitternetzes sind nicht durch gleiche Winkelabstände in der geographischen Länge und Breite getrennt, sondern haben in der *Projektionsebene* gleiche Abstände parallel zu den Achsen des kartesischen Koordinatensystems. In der Projektionsebene beträgt dieser Abstand  $190 \text{ km} = G$ . In  $90^\circ\text{N}$  (nördliche Begrenzung des DWD-Gitternetzes) ist dieser Abstand  $G \cdot m$ , also  $190 \text{ km} \cdot 0,9330 = 177,27 \text{ km}$ . In  $30^\circ\text{N}$  (südliche Begrenzung des DWD-Gitternetzes) ergibt sich der wahre Gitterabstand zu  $190 \text{ km} \cdot 1,2440 = 236,36 \text{ km}$ . Das Gitternetz ist in den einzelnen Gittern quadratisch, d.h. in der Projektionsebene (Karte) sind die Abstände in x-Richtung bzw. y-Richtung gleich groß. Das hier benutzte Gitternetz hat in x-Richtung 26 und in y-Richtung 37 Gitterpunkte.

In den vorgenommenen Berechnungen wurden für dieses Gitternetz die Gitterwerte der Bodenluftdrucktendenz, der Bodentemperatur und des Bodenluftdruckes vom DWD erstellt. Diese Berechnungen erfolgten alle 6 Stunden in der Zeit vom 01.04.1975 00.00 Uhr bis zu 26.05.1975 18.00 Uhr. Die Werte der meteorologischen Größen an den 26 mal 37 Gitterpunkten wurden auf Magnetbändern gespeichert.

### 3.2. Das Korrektionsverfahren des Deutschen Wetterdienstes

Von A. KAESTNER (1971) sind die Berechnungsverfahren des DWD-Routineprogrammes beschrieben worden. Hier sollen die wichtigsten, auch in dem hier benutzten abgeänderten Programm verwendeten Verfahren, noch einmal aufgezeigt werden. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die DWD-Gitterwerte nach einem Korrektionsverfahren erstellt wurden. Dabei wird eine noch zu beschreibende erste Näherung des meteorologischen Feldes durch Berücksichtigung aktueller synoptischer Meldungen iterativ verbessert. Eine Iterationsschleife setzt sich dabei wie folgt zusammen:

1. Schritt: Überprüfung der Verträglichkeit sämtlicher Meldungen mit der zuvor erstellten Analyse
2. Schritt: Korrektur der Analyse mit den benutzbaren Meldungen.

Bei der Überprüfung in Schritt 1 werden die aktuellen Meldungen auf ihre Verwertbarkeit überprüft. Nur Meldungen, die als richtig erkannt sind, werden zur Korrektur der Gitterwerte herangezogen. Die Korrektur für jeden Gitterpunkt wird allgemein in folgender Weise vorgenommen; aus der n-ten Näherung für einen Gitterpunkt  $f_g^n$  wird die darauffolgende Näherung  $f_g^{n+1}$  nach der Formel (10) berechnet:

$$(10) \quad f_g^{n+1} = f_g^n \frac{A \sum_i w_i K_i^H + B \sum_j w_j K_j^W + C \sum_k w_k K_k^{PS}}{A \sum_i w_i + B \sum_j w_j + C \sum_k w_k}$$

Der Index g bezieht sich auf einen Gitterwert.

In den einzelnen Summen aus der Formel (10) sind die Beobachtungen, also die synoptischen Daten, berücksichtigt. Dabei bedeuten die Abkürzungen:

$w_i, w_j, w_k$  - Gewichte für die einzelnen Stationsmeldungen

$f_g^{n+1}$  : Wert der meteorol. Variablen am Gitterpunkt g der Näherung n+1 bzw.  $f_g^n$  der Näherung n.

A, B und C sind die Gewichte für die Summen der einzelnen Meldungsarten. A regelt das Gewicht der Summe über i. In diesen Summen werden die Stationen berücksichtigt, die den Druck bzw. das Geopotential (hier die Abkürzung  $K_i$ ) gemeldet haben. Dies wird durch den hochgestellten Buchstaben H angedeutet. B ist das Gewicht der Summe über j, in der die Stationen aufsummiert werden, die nur den Wind  $K_j$  gemeldet haben. Unter geostrophischen Annahmen kann damit der Druck aus dem Wind berechnet werden. Der hochgestellte Buchstabe W bezieht sich auf die Windmeldungen, C ist der Gewichtungsfaktor für die Summe über k, in der alle Pseudomeldungen  $K_k$

berücksichtigt werden. (Hochgestellter Buchstabe PS). Pseudomeldungen sind Werte an bereits analysierten Gitterpunkten, die als "Pseudobeobachtungen" benutzt werden, also wie Beobachtungen angesehen und verarbeitet werden. Durch die Gewichtungsfaktoren A und B kann den Höhen und Windbeobachtungen ein unterschiedlicher Einfluß gegeben werden. Dies ist notwendig, da die Güte der beiden Beobachtungsarten räumlich sehr unterschiedlich ist. Im allgemeinen zieht man dabei Druck- bzw. Geopotentialmeldungen den Windmeldungen vor. Pseudomeldungen werden nur dann benutzt, wenn in datenleeren Gebieten keine anderen Beobachtungsarten vorhanden sind. Bei der ersten Iteration werden diese Pseudomeldungen überhaupt nicht berücksichtigt. Korrigiert wird dann ein Gitterpunkt mit allen denjenigen Beobachtungen, die in einem variablen Einflußkreis um diesen Gitterpunkt herum liegen. Die Abweichung zwischen der Beobachtung  $f_o$  und der n-ten Näherung am Ort der Beobachtung  $f_o^n$  wird der Differenz der Näherung aus der 1. und 2. Iteration  $f_g^{n+1} - f_g^n$  am Gitterpunkt gleichgesetzt.

$$(11) \quad f_o - f_o^n = f_g^{n+1} - f_g^n$$

Der Index o bezieht sich auf die Station und der Index g auf den Gitterpunkt. Fallen mehrere Beobachtungen in den Einflußkreis, so wird ein Mittel der berechneten Abweichungen zur Korrektur am Gitterpunkt benutzt. Für Druck- bzw. Geopotentialmeldungen modifiziert sich z.B. der erste Summand aus Gleichung (10) dann folgendermaßen:

$$A \sum_i w_i K_i^H = A \sum_i w_i (f_o - f_o^n);$$

Die schon erwähnte Iterationsschleife wird abhängig von dem zu berechnenden meteorologischen Element mehrfach durchlaufen. Bei der Erstellung der Bodenluftdruckwerte werden drei Iterationen durchlaufen. Zu Beginn einer jeden Iteration werden die Gitterpunkte herausgesucht, in deren

Einflußradius (für alle Gitterpunkte gleich groß) genügend Meldungen vorhanden sind. Die Werte an diesen Gitterpunkten werden als erste korrigiert. Dann wird der Einflußradius vergrößert und es werden nur die Gitterwerte korrigiert, die vorher noch nicht abgeändert wurden. In Gebieten, wo die Meldungsdichte sehr gering ist, werden dazu bereits korrigierte Gitterpunkte als Pseudomeldungen herangezogen. Das Gewicht  $w_i$ , welches dabei der einzelnen Meldung gegeben wird, errechnet sich aus der Entfernung zwischen Meldungsort und Gitterpunkt:

$$(12) \quad w = \frac{R^2 - D^2}{R^2 + P \cdot D^2}$$

R : Radius des Einflußkreises

D : Entfernung Meldungsort - Gitterpunkt

P : Regelfaktor, der das Verhältnis von nahen zu entfernten Stationen bestimmt.

Der Parameter P regelt, wie sich das Gewicht mit zunehmender Entfernung verändert. Es läßt sich so das Gewichtsverhältnis von nahen und entfernten Stationen bestimmen. Bei den Berechnungen des Bodenluftdruckes wird P so gewählt, daß die nahen Beobachtungen großes Gewicht bekommen, um kleinräumige Einzelheiten zu erfassen. P nimmt dabei große Werte an. A. KAESTNER (1971) weist jedoch darauf hin, daß die Gewichtsfunktion wenig Einfluß auf das Ergebnis der Analyse hat. Eine Variation von P im Bereich von 0,1 bis 10 verändert das Ergebnis der Analyse kaum.

### 3.2.1. Benutzte synoptische Daten

Ist die Meldungsdichte regional überhöht, so ist eine zu genaue Berücksichtigung der einzelnen Stationen uneffektiv, wegen der dann zu erwartenden starken Inhomogenität der Gitterwertsdaten und der anschließenden notwendigen Glättung. Dies trifft vor allem in Gebieten zu, in denen einige Gitterwerte durch viele Landstationen gut und benachbarte Gitterwerte im Analysengitter durch wenige Schiffsmeldungen



schlecht oder durch das Fehlen von Meldungen durch die Anfangsnährung ungenau bestimmt werden. Daher werden in Gebieten mit vielen Stationen einige Meldungen aussortiert - auch aus Gründen der Rechenzeitoptimierung - und nicht in das Korrektionsverfahren einbezogen. Dies geschieht derart, daß innerhalb eines Gitterquadrates die extremen Werte beibehalten werden. Um eine gleichmäßige Meldungsdichte pro Gitterquadrat zu erhalten, werden in dem benutzten Programm des Wetterdienstes pro Gitterquadrat maximal drei Stationen berücksichtigt. Bergstationen, Stationen, bei denen die gemeldeten Werte fraglich erscheinen und Stationen, die einen meteorologischen Parameter nicht gemeldet haben, werden sofort gekennzeichnet und aussortiert. Sind dann in einem Gitterquadrat noch mehr als drei Meldungen vorhanden, so werden auch diese bis auf drei Stationen nach mehreren unterschiedlichen Kriterien eliminiert. Sind von vornherein weniger als vier Stationsmeldungen in einem Gitterquadrat zu finden, so werden alle diese Stationen benutzt, wenn sie nicht als fraglich oder falsch angesehen werden.

### 3.2.2. Die Anfangsnährung

Um die meteorologischen Informationen der Stationsmeldungen auf die Gitterwerte zu übertragen, müssen dort entsprechend dem Prinzip des beim DWD angewendeten Korrektionsverfahrens Anfangswerte gegeben sein. Die Anfangswerte sind Nährungswerte und entsprechen somit der ersten Nährung. Dieser Anfangsnährung kommt eine starke Bedeutung zu, da in datenarmen Gebieten die Analyse bei diesem Korrektionsverfahren stark von dem vorgegebenen Feld bestimmt wird. Folgender Ablauf bei der Erstellung der Anfangswerte hat sich in diesem Korrektionsverfahren beim DWD bewährt:

1. Analyse der Bodenluftdrucktendenz. Diese Analyse wird bei der Berechnung der Anfangsnährung des Bodenluftdruckes verwendet.

2. Analyse des Bodenluftdruckes. Dabei ist

$$P_{\text{"Anfang"}} = P_{\text{"Analyse"}, t-6} + J_{\text{"Analyse"}, t-6} + J_{\text{"Analyse"}, t}$$

P : Bodenluftdruck

J : Bodenluftdrucktendenz

t : aktuelle Analysenzeit

3. Analyse der Bodentemperatur. Die Nährungswerte der Bodentemperatur werden in diesem Programm durch eine Glättung der sechs Stunden alten Analyse erhalten. Dann wird mit aktuellen synoptischen Daten das Temperaturfeld korrigiert.

### 3.2.3. Die benutzte Glättung

Bei dem benutzten Korrektionsverfahren ergibt sich stets das Problem, daß die fertige Analyse immer dann rauh ist, wenn die Nährung einen anderen Gradienten besitzt, als es den Meldungen entspricht. Dann ist es unablässig, die gerade gewonnene Analyse zu glätten. Diese Glättung soll, wenn möglich, nach jeder Iteration vorgenommen werden. Dabei soll der Glättungsoperator die meteorologische relevanten Wellenlängen unverändert lassen und nur die "Rauheit", den kurzwelligen Lärm, herausfiltern und unterdrücken. In dem Routineprogramm des DWD wird dazu für den Gitterpunkt mit den Koordinaten  $i, j$  folgender von A. KAESTNER beschriebener Glättungsoperator verwendet:

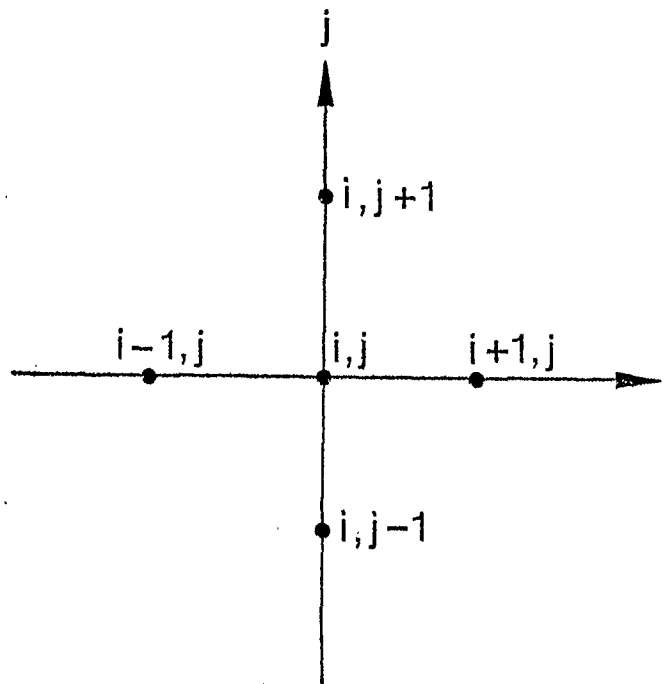
$$(13) \quad \overline{f_{i,j}} = \frac{(\beta-4) f_{i,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1} + f_{i+1,j} + f_{i-1,j}}{\beta}$$

— : geglätteter Wert

$i, j$  : Koordinatenindices

$\beta$  = Regelparameter

Folgende Gitterwerte werden bei diesem Glättungsoperator benutzt:



Es ist möglich, durch eine geeignete Wahl von  $\beta$  für die verschiedenen Iterationen eine wellenabhängige Glättung zu erreichen. In dem benutzten Programm wird nach dem Durchlaufen der ersten Iteration der Glättungsoperator (13) modifiziert angewendet. Er ergibt sich dabei zu:

$$(14) \quad \overline{f_{i,j}} = \frac{(f_{i,j+1} + f_{i,j-1} + f_{i+1,j} + f_{i-1,j})}{\beta}$$

Es werden dabei sämtliche Gitterwerte in einem Durchgang geglättet, und zwar mit dem Wert  $\beta = 4$ . Der modifizierte Glättungsoperator (14) bewirkt, daß der Wert am Gitterpunkt  $i,j$  aus dem Mittel der vier umliegenden Gitterwerte bestimmt wird. Dabei wird eine grobe Glättung erreicht, bei der Störungen kleiner Wellenlängen ausgefiltert werden. Nach der zweiten und dritten Iteration wird dann der Glättungsoperator (13) dreimal hintereinander angewendet, wobei  $\beta$  die Werte -16,7 und -16 erhält. Dadurch werden auch feinere Strukturen im Datenfeld an den Gitterpunkten erfaßt. Der Gitterwert mit den Koordinaten  $i,j$  wird durch diese Werte von  $\beta$  stark berücksichtigt und durch die vier umliegenden

Gitterwerte nur gering abgewandelt. Trotz einer Glättung sollen die Kerne der Druckzentren unverändert bleiben. Daher wird in der Endanalyse nicht an allen Gitterpunkten der geglättete Wert übernommen, sondern es wird, abhängig von der Differenz geglätteter - ungeglätteter Wert, an manchen Gitterpunkten der ungeglättete Wert benutzt. An anderen Gitterpunkten bildet man einen Mittelwert aus dem geglätteten und dem ungeglätteten Wert. Die Entscheidung, welcher Wert tatsächlich benutzt wird, ist durch verschiedene Kriterien festgelegt, die alle bewirken, daß die Endanalyse möglichst glatt sein soll.

Der folgenden Tabelle (I) kann entnommen werden, mit welchen Einflußradien pro Iteration das Bodenluftdruckfeld erstellt wurde. Dabei ist der Einflußradius um einen Gitterpunkt in Einheiten der Gitterlänge angegeben. In der ersten Iteration werden sechs Rechendurchgänge ausgeführt, wobei jeweils der Einflußradius vergrößert wird. In jedem Rechendurchgang werden die Gitterwerte korrigiert, in deren Einflußradius aktuelle Meldungen synoptischer Stationen vorhanden sind. Mit der ersten Iteration wird ein verhältnismäßig grobes Bild der Analyse gewonnen, da große Einflußradien benutzt werden. Deshalb wird nach dieser Iteration auch mit dem modifizierten Glättungsoperator (14) und dem Wert  $\beta = 4$  eine grobe Glättung vorgenommen. In der zweiten und dritten Iteration erhält die Analyse durch die Wahl kleinerer Einflußradien eine feinere Struktur. Nach diesen Iterationen wird jeweils mit dem Glättungsoperator (13) und den Werten für  $\beta = -16,7$  und  $-16$  in drei Durchgängen geglättet.

TABELLE I

Iteration	Durchgang	Einflußradius i, Maschenweiten
I	1	1,0
	2	2,0
	3	3,0
	4	4,0
	5	6,0
	6	8,0
Glättung mit Operator (14) und $\beta = 4$ in einem Durchgang		
II	1	0,5
	2	1,0
	3	1,5
	4	2,0
	5	2,5
	6	3,0
	7	3,5
	8	4,0
	9	5,5
Glättung mit Operator (13) und $\beta = -16, 7, -16$		
III 9 Durchgänge mit den Einflußradien der II. Iteration		
Glättung wie nach der zweiten Iteration		

#### 4. INTERPOLATION AUF DAS KIELER GITTER

Aus dem Bereich der erstellten DWD Analyse (Abb. 5) wurde für die Erstellung der Kieler Gitterwerte ein Gebiet ausgewählt, welches die gesamte Ostsee überdeckt. Abb. 6 zeigt dieses Gebiet. Für dieses Gebiet wird das Bodenluftdruckfeld berechnet. In den kartesischen Koordinaten des DWD Gitters läßt sich das ausgewählte Gebiet in den folgenden Begrenzungen angeben:

$x = 14$  bis  $x = 23$  (9 DWD Gitterlängen)

$y = 15$  bis  $y = 25$  (10 DWD Gitterlängen)

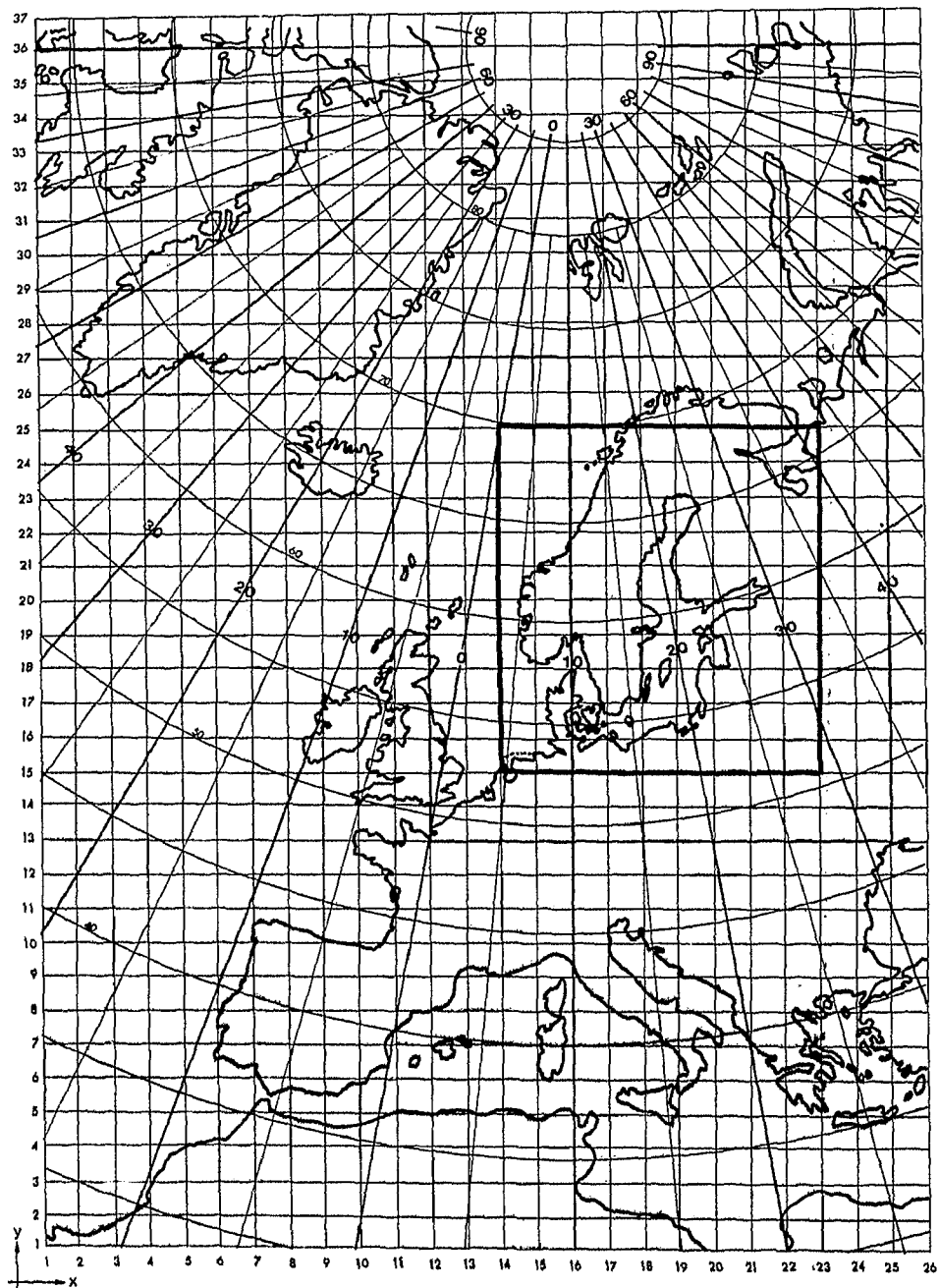


Abb. 5 zeigt das Gitternetz des abgeänderten Analysenprogrammes des DWD. An den Gitterpunkten sind der Bodenluftdruck, die Bodentemperatur und die Drucktendenz angegeben. Stark umrandet ist das Gebiet des Kieler Gitternetzes. Schwach umrandet ist das Gebiet, welches zur Interpolation herangezogen wurde (siehe Abschnitt 4.2.)

In dem neu erstellten Kieler Gitternetz hat der DWD Gitterpunkt  $x = 14$ ,  $y = 15$  die Kieler Gitterkoordinaten  $x' = 1$ ,  $y' = 1$ . Somit hat das Kieler Gitternetz 37 Gitterpunkte in  $x'$ -Richtung und 41 Gitterpunkt in  $y'$ -Richtung. Für alle 37 mal 41 Gitterpunkte werden die Druckdaten berechnet

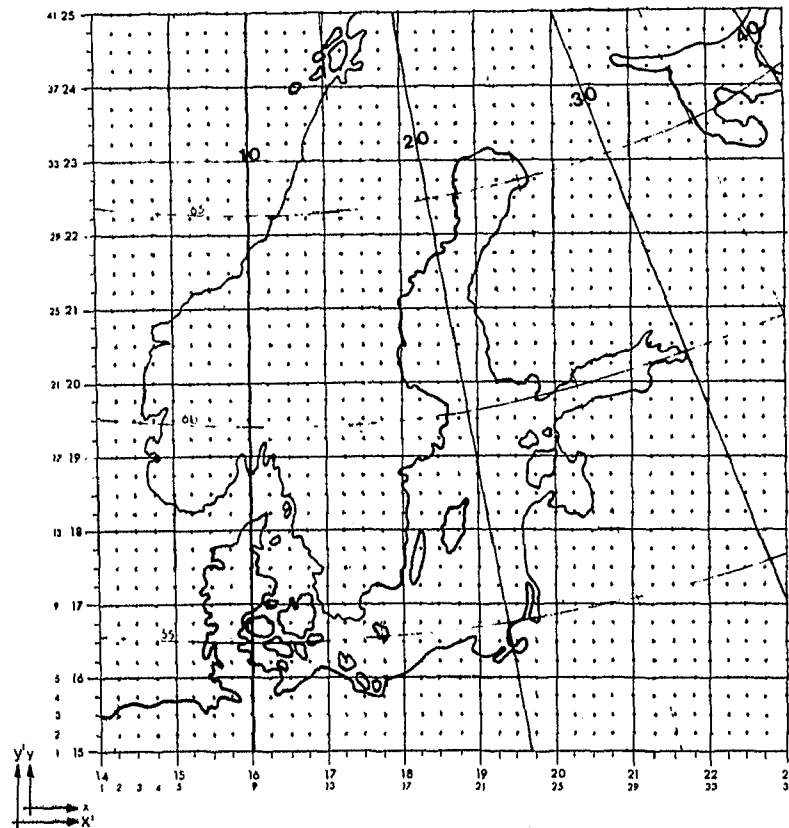


Abb. 6 zeigt das Kieler Gitternetz. Die inneren Koordinatenangaben beziehen sich auf die DWD Gitterkoordinaten mit dem Index  $x$ ,  $y$ ; die äußeren Koordinatenangaben gelten für die Kieler Gitterkoordinaten mit dem Index  $x'$ ,  $y'$ . Für die Gitterpunkte • des Kieler Gitters wird der Bodenluftdruck berechnet.

#### 4.1. Die Einteilung für das Kieler Gitternetz

Jedes DWD Gitterquadrat wurde in 16 kleine Gitterquadrate für das Kieler Gitternetz aufgeteilt (Abb. 7). Somit beträgt die mittlere Entfernung von Gitterpunkt zu Gitterpunkt im Kieler Gitternetz in  $60^{\circ}\text{N}$  47,5 km, da eine Gitterlänge des DWD Gitters dort 190 km entspricht (siehe stereographische

Projektion Abschnitt 2.1.). Wird die Gitterlänge des DWD Gitters als eine Einheit gewählt  $L = 1$ , so haben die Kieler Gitterkoordinaten einen relativen Abstand von 0,25 Einheiten.

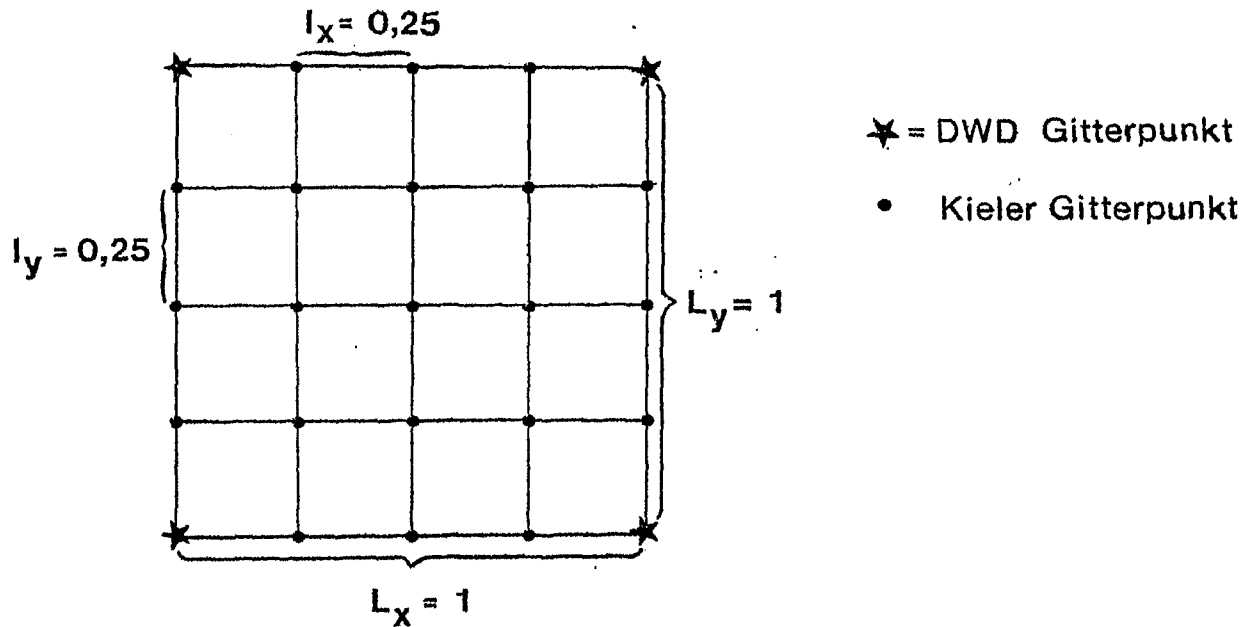


Abb. 7 zeigt die Anordnung der Kieler Gitterpunkte innerhalb eines DWD-Gitterquadrates.  $L_x = L_y = 1 \hat{=}$  eine DWD-Gitterlänge;  $l_x = l_y = 0,25 \hat{=}$  eine Kieler Gitterlänge

#### 4.2. Die bikubische Interpolation

In dem nun folgenden Teil wird die Interpolationsmethode vorgestellt, mit der die Kieler Gitterwerte berechnet wurden. Hierfür wird ein Polynom sechsten Grades benutzt. Dieses Polynom verwendet L.S. GANDIN (1965) für ein Iso-barenzeichenprogramm. Das Polynom ist kubisch in Bezug auf die x- bzw. die y-Koordinate. Daher kommt der Ausdruck "bikubisches Polynom":



$$\begin{aligned}
 P_{x',y'} = & A_{00} + A_{10} \bar{x} + A_{01} \bar{y} + A_{20} \bar{x}^2 + A_{11} \bar{x}\bar{y} + A_{02} \bar{y}^2 \\
 (15) \quad & + A_{30} \bar{x}^3 + A_{21} \bar{x}^2 \bar{y} + A_{12} \bar{x} \bar{y}^2 + A_{03} \bar{y}^3 + A_{31} \bar{x}^3 \bar{y} + A_{22} \bar{x}^2 \bar{y}^2 \\
 & + A_{13} \bar{x} \bar{y}^3 + A_{32} \bar{x}^3 \bar{y}^2 + A_{23} \bar{x}^2 \bar{y}^3 + A_{33} \bar{x}^3 \bar{y}^3
 \end{aligned}$$

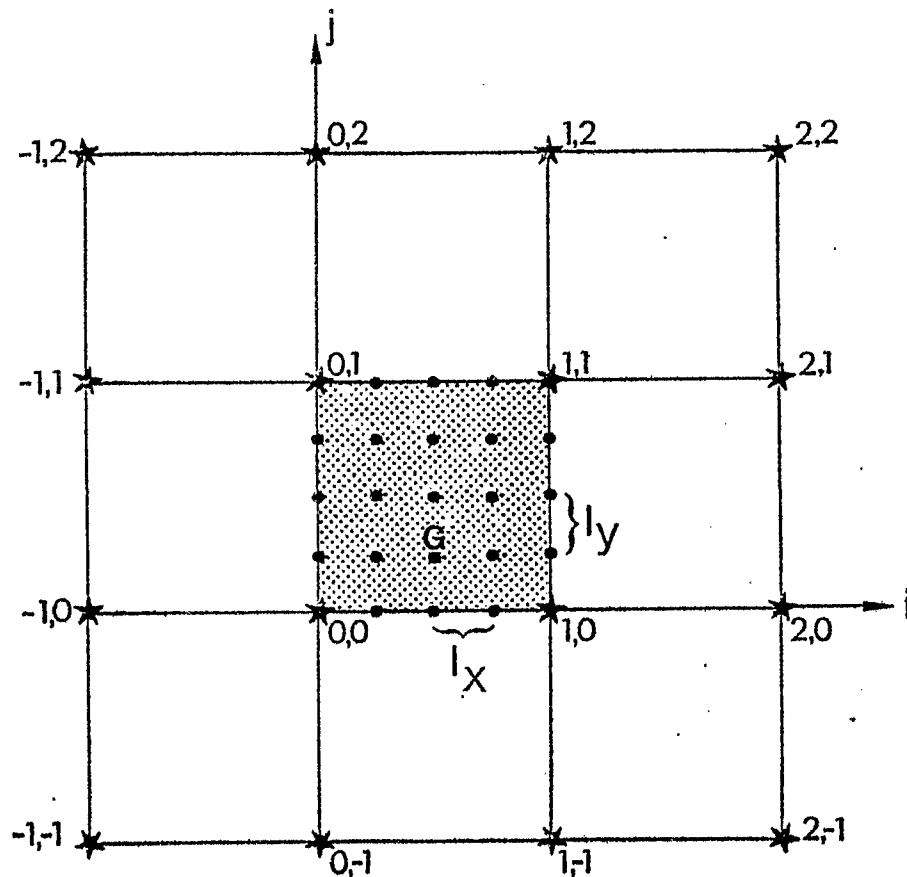
$P_{x',y'}$  ist der zu berechnende Druckwert an dem Kieler Gitterpunkt mit den Koordinaten  $x',y'$ .  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind Anteile der DWD Gitterlänge  $L_x$  bzw.  $L_y$  und variieren innerhalb eines DWD-Gitterquadrates mit der Schrittweite der Kieler Gitterlänge  $l_x = l_y = 0,25$  zwischen 0,0 und 1,0.

Das Polynom repräsentiert eine Hyperboloidfläche. Ein Schnitt entlang einer x- oder y-Achse ergibt ein Polynom dritter Ordnung als Schnittkurve. Diese Schnittkurve ist durch vier Gitterwerte exakt bestimmbar. Da bei dem bikubischen Polynom sowohl in x- als auch in y-Richtung interpoliert wird, werden zur eindeutigen Bestimmung des Polynoms 16 DWD-Gitterwerte herangezogen. Diese 16 DWD-Gitterwerte sollen exakt erfüllt sein. Dann läßt sich, wie L.S. GANDIN (1965) zeigt, das Polynom (15) in folgender Weise darstellen (Formel (16) - siehe umseitig).

Die Anordnung der dabei benutzten 16 Gitterwerte  $P_{i,j}$  entnehme man aus der Abb. (8). Innerhalb des in Abb. (8) schraffierten DWD-Gitterquadrates werden die Werte an den Kieler Gitterpunkten durch die Interpolationsformel (16) berechnet. Die  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  Werte variieren dabei und nehmen die Werte 0,0, 0,25, 0,5, 0,75 und 1,0 an. Damit können dann, wie aus Abb. (7) erkennbar, sämtliche Kieler Gitterpunkte innerhalb eines DWD-Gitterquadrates erfaßt werden. Das schraffierte DWD-Gitterquadrat heißt im folgenden BGQ (BerechnungsGitterQuadrat).

Das berechnete Gebiet der Ostsee (Abb. 6), wird von 90 DWD-Gitterquadraten überdeckt. In jedem dieser Gitterquadrate werden mit dem bikubischen Polynom (16) die Kieler Gitter-

$$\begin{aligned}
 P(x', y') = & \frac{1}{36} P_{-1,-1} \bar{x}(1-\bar{x}) (2-\bar{x}) \bar{y} (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{-1,0} \bar{x}(1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{1,1} \bar{x}(1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{36} P_{-1,2} \bar{x}(1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (1-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{0,-1} (1+\bar{x}) (1-\bar{x}) (2-\bar{x}) \bar{y} (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{4} P_{0,0} (1+\bar{x}) (1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{4} P_{0,1} (1+\bar{x}) (1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{0,2} (1+\bar{x}) (1-\bar{x}) (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (1-\bar{y}) - \\
 (16) \quad & - \frac{1}{12} P_{1,-1} (1+\bar{x}) \bar{x} (2-\bar{x}) \bar{y} (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{4} P_{1,0} (1+\bar{x}) \bar{x} (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{4} P_{1,1} (1+\bar{x}) \bar{x} (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{1,2} (1+\bar{x}) \bar{x} (2-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (1-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{36} P_{2,-1} (1+\bar{x}) \bar{x} (1-\bar{x}) \bar{y} (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{2,0} (1+\bar{x}) \bar{x} (1-\bar{x}) (1+\bar{y}) (1-\bar{y}) (2-\bar{y}) - \\
 & - \frac{1}{12} P_{2,1} (1+\bar{x}) \bar{x} (1-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (2-\bar{y}) + \\
 & + \frac{1}{36} P_{2,2} (1+\bar{x}) \bar{x} (1-\bar{x}) (1+\bar{y}) \bar{y} (1-\bar{y}).
 \end{aligned}$$



★ DWD Gitterpunkte

• Gitterpunkte im Kieler Gitternetz

▨ Bereich, in dem interpoliert wird (BGQ)

i, j Indizes

Abb. 8 zeigt die Anordnung der DWD-Gitterpunkte, die zur Berechnung der Kieler Gitterpunkte innerhalb eines BGQ's herangezogen werden.

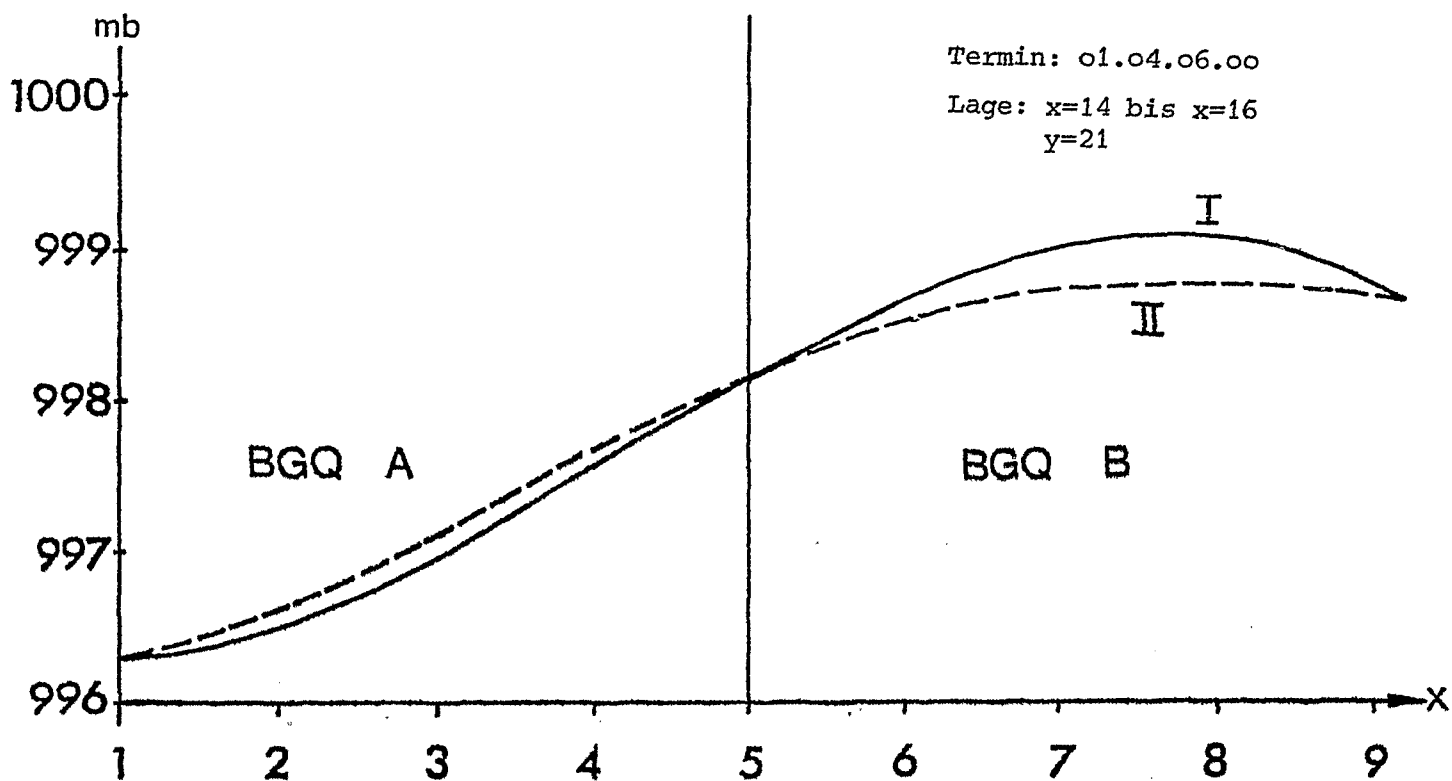
werte erstellt. Um auch die Gitterquadrate am Rand des betrachteten Feldes mit berechnen zu können, wurde das Gebiet für die Berechnungen erweitert. Es wurden dazu alle DWD-Gitterwerte herangezogen, die in dem Bereich liegen, der in Abb. (5) schwach umrandet ist. Durch die Angabe der DWD-Gitterkoordinate für den Gitterpunkt  $i, j$  wird der Koordinatenursprung bestimmt. Damit wird das BGQ festgelegt und aus Gleichung (16) ergeben sich die zur Berechnung notwendigen weiteren 15 DWD-Gitterwerte. Innerhalb eines BGQ's werden dann sämtliche Kieler Gitterwerte berechnet. Die vier Eckwerte des BGQ's werden in das Kieler Gitternetz mit übernommen.

Beispiel: wenn  $\bar{x}$  und  $\bar{y} = 0,0$  sind, dann folgt nach der Abbildung (8)  $P_{x',y'} = P_{i,j}$ . Für die Berechnung des Kieler Gitterwertes  $G$  in Abb. (8) muß in Gleichung (16)  $\bar{x}$  den Wert  $0,5$  und  $\bar{y}$  den Wert  $0,25$  bekommen.

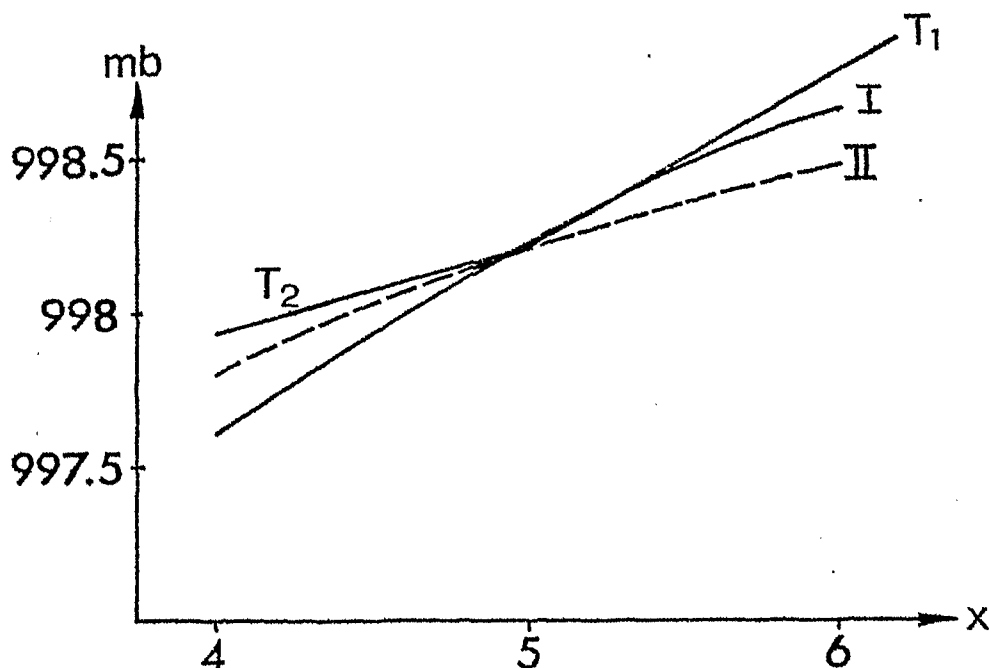
Das bikubische Interpolationspolynom ist innerhalb eines BGQ's stetig differenzierbar. Innerhalb des BGQ's ist es somit möglich, den Druckgradienten und daraus den geostrophischen Wind analytisch zu bestimmen. Die Stetigkeit des Polynoms (16) ist auch auf den Rändern eines BGQ's gewährleistet. Dies liegt an der eindeutigen Bestimmbarkeit der Schnittkurven entlang einer  $i$ - oder  $j$ -Koordinate. Es soll hier darauf hingewiesen werden, daß die stetige Differenzierbarkeit nur innerhalb eines BGQ's möglich ist. Der Gradient, der nicht parallel zum Rand eines BGQ's genommen wird, kann auf dem Rand einen unstetigen Sprung aufweisen. Die auftretenden Unstetigkeiten sind jedoch wegen der Stetigkeit der Geopotentialfunktion schwach und daher für den meteorologischen Sachverhalt bei einer Gradientbildung vernachlässigbar. Je größer zudem das Intervall ist, über das der Gradient genommen wird, desto geringer wirkt sich der Fehler der Unstetigkeit aus, denn der Gradient ist definiert als der Anstieg einer Funktion; das heißt: Gradient = Differenz der Funktionswerte dividiert durch den Abstand der Gitterpunkte. Dieser beschriebene Sachverhalt kann an einem Beispiel verdeutlicht werden: Für den Fall  $\bar{y} = \text{konstant}$  wurden mit der Gleichung (16) durch eine schrittweise Vergrößerung von  $\bar{x}$  im Bereich  $0,0 \leq \bar{x} \leq 2,0$  insgesamt neun Kieler Gitterwerte berechnet. In Abb. 10 und 11 sind die errechneten Druckkurven aufgetragen.

In Abb. 9 sind die Kieler Gitterwerte 1 bis 9 eingezeichnet, für die im Fall  $\bar{y} = \text{constant}$  durch schrittweise Vergrößerung von  $\bar{x}$  im Bereich  $0,0 \leq \bar{x} \leq 2,0$  die Druckwerte berechnet wurden. A und B sind BGQ's, wobei für die Interpolation im BGQ A die mit einem Kreis gekennzeichneten DWD-Gitterwerte, für die Interpolation in B die mit einem Stern versehenen DWD-





**Abb. 10** Die Druckkurven der Gitterwerte 1 bis 9 sind eingetragen. Ausgezogene Linie (Kurve I): die Berechnung des Bodenluftdruckes an den Gitterpunkten 1 bis 9 erfolgte durch die in Abb. 9 mit einem Kreis gekennzeichneten DWD-Gitterwerte. Gestrichelte Linie (Kurve II): die Berechnung an den Gitterwerten erfolgte durch die in Abb. 9 mit einem Stern versehenen DWD-Gitterwerte  
Für die Kieler Analysen sind folgende Gitterwerte verwendet:  
Gitterwerte 1 bis 5 der Kurve I (in Abb. 9 BGQ A) und die Gitterwerte 6 bis 9 der Kurve II (Abb. 9 BGQ B).



**Abb. 11** Hier sind die Tangenten T1 und T2 an die Kurven I und II im Gitterpunkt 5 angelegt. Dieser Gitterwert liegt auf dem Rand eines BGQ's (siehe Abb. 9). Die unterschiedliche Steigung der Druckkurven in diesem Punkt ist ein Maß für die Unstetigkeit bei einer Interpolation, die nicht parallel zum Rand eines DWD-Gitterquadrates vorgenommen wird. Der Druckwert am Gitterpunkt 5 ist eindeutig durch die DWD-Gitterwerte I bis IV in Abb. 9 festgelegt.

als die in den Kieler Analysen repräsentativen Werte 6 bis 9 berechnet mit dem BGQ B. Wie schon erwähnt, sind die auftretenden Unstetigkeiten jedoch schwach, das gezeigte Beispiel stellte einen Extremfall dar.

## 5. UEBERPRUEFUNG DER INTERPOLATIONSERGEBNISSE

In der folgenden Untersuchung wird überprüft, wie exakt mit dem benutzten Interpolationspolynom das Druckfeld im Kieler Gitternetz errechnet werden kann; wie gut also die Anpassung der berechneten Gitterwerte an das aktuelle Druckfeld ist. Für diese Überprüfungen werden synoptische Bodenbeobachtungen benutzt.

### Synoptische Meldungen:

Für den gleichen Zeitraum, für den die DWD-Gitterwerte beim Deutschen Wetterdienst in Offenbach berechnet wurden, lagen synoptische Bodenmeldungen aus dem Analysengebiet vor. Diese Meldungen entsprechen den archivierten Meldungen, die der DWD ebenfalls für seine Analysenberechnungen heranzieht. Für den gesamten Zeitraum des Unternehmens "BALTIC 75" wurden diese synoptischen Meldungen gesammelt und auf Magnetbändern archiviert.

### 5.1. Überprüfung der synoptischen Meldungen

Zuerst wurden die zur Verfügung stehenden Meldungen überprüft. Dies geschah für jeden berechneten Termin. Dabei existiert für jede einzelne Stationsmeldung auf Magnetband ein Schlüsselwort, in dem Unsicherheitskennungen verschlüsselt sind. Dieses Schlüsselwort gibt Auskunft über die Verwendbarkeit einer jeden Stationsmeldung. Es kennzeichnet Doppelmeldungen, die Eindeutigkeit der Meldungszeit, zeitliche Widersprüche von Drucktendenz und aktueller Druckmeldung sowie fragliche Druckmeldungen selbst.

## 5.2. Direkte Vergleichsprüfung

Stationen, die nach der Abfrage des Schlüsselwortes als verwertbar eingestuft wurden, konnten dann weiter zur Überprüfung der Interpolationsergebnisse herangezogen werden. Von diesen Stationen wurden die stereographischen Stationskoordinaten  $\phi$  und  $\lambda$  in die kartesischen Koordinaten des benutzten DWD-Gitternetzes umgerechnet. Diese Umrechnung erfolgte nach den Berechnungen der stereographischen Projektion (Abschnitt 3.1., Formel 8 und 9).

Durch die Angabe der kartesischen Stationskoordinaten im DWD-Gitternetz wird dann das Basisgitterquadrat bestimmt. Damit sind auch die 16 DWD-Gitterpunkte festgelegt, die bei der Berechnung des Bodenluftdruckes für die benutzte Interpolationsformel (16) notwendig sind. Mit den Druckwerten aus den 16 DWD-Gitterpunkten wird dann *auf den Ort* der gemeldeten Station interpoliert. Dadurch ist ein Vergleich zwischen dem gemeldeten und dem bikubisch errechneten Druckwert am Ort der Station möglich. Dazu wird folgende Differenz am Ort der Station gebildet: ERRECHNETER WERT - GEMELDETER WERT.

Da durch die Berechnung der Kieler Gitterwerte mit dem bikubischen Interpolationspolynom (16) eine Hyperboloidfläche durch die 37 mal 41 Gitterpunkte des Kieler Gitters gelegt wurde, ist die betrachtete Differenz die Abweichung des gemeldeten Druckes von dem berechneten Druckwert dieser Hyperboloidfläche am Ort der Station. Somit gibt diese Differenz einen Wert für den Grad der Anpassung der bikubischen Interpolationsmethode an die tatsächlichen Druckverhältnisse. Geht man davon aus, daß die aus den DWD-Gitterwerten berechneten Kieler Gitterwerte innerhalb realistischer Abweichungen das aktuelle Druckfeld des Analysentermins schon repräsentativ darstellen, so können die betrachteten Differenzen nicht unbegrenzt groß sein. Daher sollen Stationsmeldungen, für die sich große Differenzen berechnen, als Falschmeldungen angesehen werden. Nach



zahlreichen statistischen Überprüfungen mit unterschiedlich vorgegebenen maximalen Grenzwerten für die noch zulässigen Differenzwerte, ergab sich ein realistischer Grenzwert für die Differenz mit einem Absolutbetrag von 3,0 mb. Stationen, an denen größere Differenzen als  $\pm 3,0$  mb berechnet wurden, galten fortan als Falschmeldungen. Dadurch wurden durchschnittlich sechs bis acht Stationsmeldungen pro Analysentermin nicht berücksichtigt. Diese Stationen, hauptsächlich in West-Norwegen wiesen zum Teil erheblich größere Differenzen auf, nämlich bis zu  $\pm 18,0$  mb. Bei den übrigen Stationsmeldungen errechneten sich Abweichungen zwischen gemeldetem und errechneten Druck in den Grenzen von 0,0 mb bis zu 3,0 mb.

### 5.3. Bedeutung der Differenzen

Die errechneten Differenzen können sowohl negativ als auch positiv sein. Differenzen, deren Absolutbetrag kleiner als 0,5 mb ist, wurden hier nicht weiter untersucht, da in solchen Fällen die Anpassung des errechneten Feldes an das tatsächliche meteorologische Druckfeld als gut angesehen wird. Die restlichen Differenzen sind gesondert betrachtet worden. Aus den berechneten Kieler Gitterwerten wurde mit einem Zeichenprogramm die berechnete Isobarenverteilung des Bodenluftdruckfeldes gezeichnet. Am Ort der überprüften Station wird in diesem Zeichenprogramm ebenfalls die errechnete Differenz ausgedruckt. Dadurch erhält man einen schnellen Überblick über Gebiete, in denen die Anpassung der gemeldeten Werte an die errechneten Werte gut oder schlecht ist. In einem idealisierten Beispiel soll nun die Bedeutung des Vorzeichens der betrachteten Differenz behandelt werden (s. Abb. 12).

Ist die Abweichung positiv, der errechnete Druck am Ort der Station also zu groß, so verlaufen die Isobaren im tatsächlichen Feld stärker zyklonal gekrümmt, als das im errechneten Feld der Fall ist. Ist die Abweichung negativ, so ist

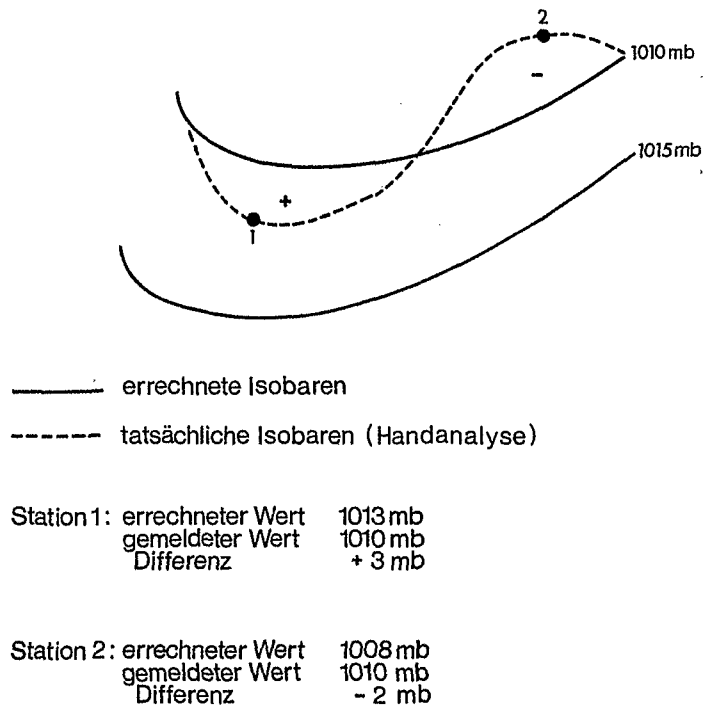


Abb. 12 zeigt für ein idealisiertes Beispiel den errechneten Isobarenverlauf und den tatsächlichen, aus Handanalysen gewonnenen Isobarenverlauf.

der errechnete Druck an der Station zu niedrig. Im tatsächlichen meteorologischen Feld müßten dann die Isobaren stärker antizyklonal gekrümmt sein.

Bei der Überprüfung der Analyse, errechnet aus den Kieler Gitterwerten, konnte mit Hilfe der Stationsmeldungen und der beschriebenen Differenzenbildung festgestellt werden, daß in einigen Gebieten eine unterschiedlich gute Anpassung an die gemeldeten Stationsmeldungen berechnet wird. Folgendes hat sich dabei gezeigt: es existieren größere zusammen-

hängende Gebiete, die sich über mehrere DWD-Gitterquadrate erstrecken, in denen wie in Abb. 13 ersichtlich, die Differenzen alle das gleiche Vorzeichen aufweisen. Da eine zufällige Verteilung der Differenzen somit nicht zutrifft, also die Differenzen eher als systematisch anzusehen sind, scheinen hier die Druckverhältnisse so zuzutreffen, wie sie in Abb. 12 idealisiert dargestellt sind. Es ist anzunehmen, daß durch die benutzte Glättung der DWD-Gitterwerte bei ihrer Erstellung diese systematischen Abweichungen zustande kamen. In Abb. 13 ist für den Termin 24.04.1975 06.00 Uhr ein Beispiel für die systematische Verteilung der Differenzen aufgezeigt. Im Gebiet des Troges über der Ostsee ist klar zu erkennen, daß nur positive Differenzen auftreten, also der berechnete Druckwert an den Stationen zu groß ist. Über Nordwestdeutschland und Nordwestnorwegen berechnen sich negative Differenzen; der berechnete Druckwert an den Stationen ist hier zu gering. Der errechnete Isobarenverlauf ist dann in größeren Gebieten ein anderer, als der tatsächlich gegebene Isobarenverlauf, der mit Hilfe von Handanalysen erstellt werden kann.

Durch die vorgenommene Interpolationsmethode läßt sich also das Druckfeld und somit der Isobarenverlauf des Bodenluftdruckes nicht exakt aus den Basisdaten des DWD's über die Werte an den Kieler Gitterpunkten bestimmen. Es ist daher die Möglichkeit betrachtet worden, die DWD-Gitterwerte abzuwandeln. Sind im Bereich der vier DWD-Gitterquadrate, die einen DWD-Gitterpunkt umgeben, nur Stationen, an denen der berechnete Druckwert zu groß ist (positive Differenzen) so muß der DWD-Gitterwert vermindert werden. Sind die betrachteten Differenzen sämtlich negativ, so soll der DWD-Gitterwert erhöht werden. Aus den *abgewandelten* DWD-Gitterwerten können dann die Kieler Gitterwerte *neu* berechnet werden.

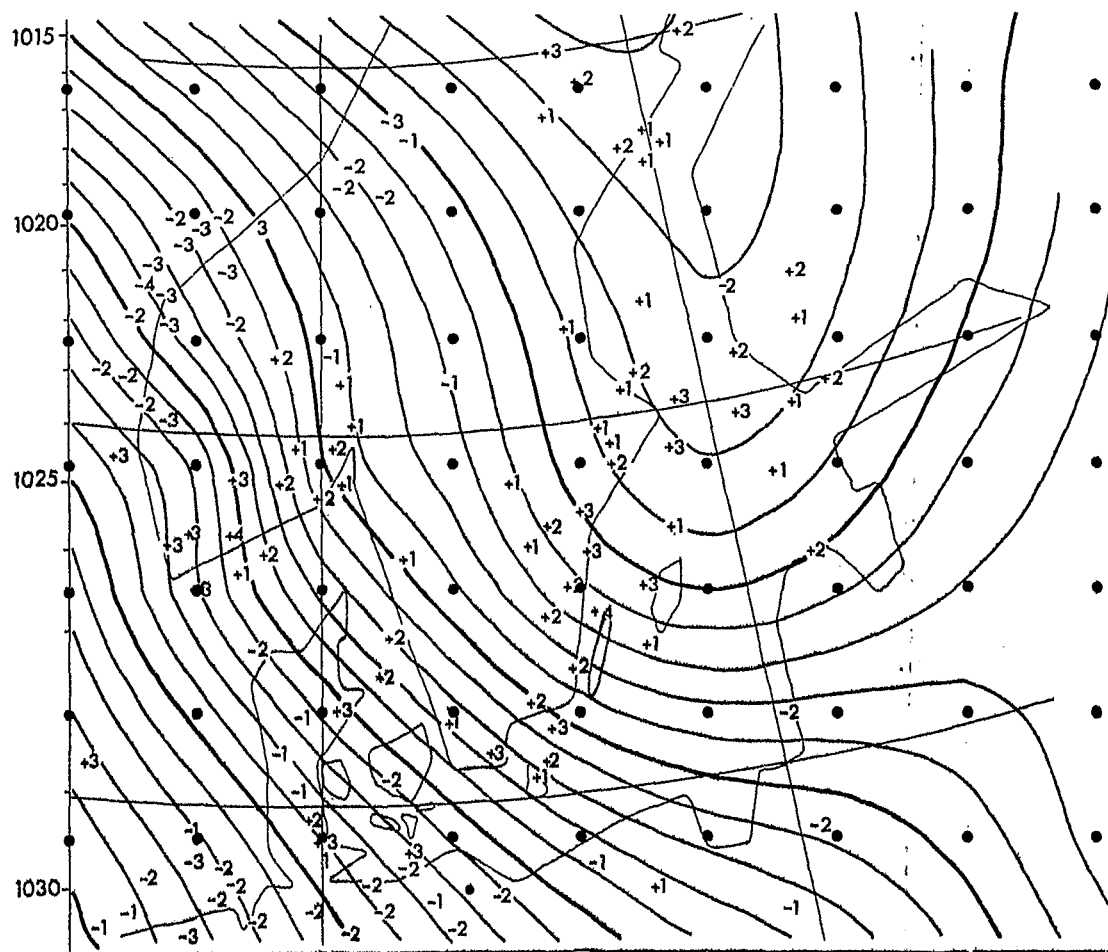


Abb. 13

zeigt für den Termin 24.04.1975 06.00 Uhr die systematischen Abweichungen der Differenzen  $DIFF = \text{berechneter} - \text{gemeldeter Druckwert}$ . Dabei ist folgende Legende benutzt worden:

• kennzeichnet die Lage eines DWD-Gitterpunktes.

Die Isobaren sind in 1 mb Abstand eingezeichnet

Kennziffer 1	0,5 mb < DIFF < 1,0 mb
2	1,0 mb < DIFF < 1,5 mb
3	1,5 mb < DIFF < 2,0 mb
4	2,0 mb < DIFF < 2,5 mb
5	2,5 mb < DIFF < 3,0 mb

## 6. ABWANDLUNG DER DWD-GITTERWERTE

Bisher ist bei der rein mathematischen Interpolation von den DWD-Gitterwerten auf die Kieler Gitterwerte keine neue zusätzliche meteorologische Information berücksichtigt worden. Bei der Erstellung der DWD-Gitterwerte werden aber nur maximal drei Stationsmeldungen pro DWD-Gitterquadrat zur Berechnung der Gitterwerte herangezogen. Dadurch werden bei den Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes in dem hier betrachteten Gebiet ca. 130 Stationsmeldungen berücksichtigt. In diesem Meldungsgebiet haben aber bis zu 360 Stationen den Bodenluftdruck gemeldet. Es sollen hier bei der zu beschreibenden Abwandlung der DWD-Gitterwerte nun alle Stationen berücksichtigt werden, die in diesem Gebiet gemeldet haben. Dadurch werden neue meteorologische Informationen in die zu erstellende Analyse mit einbezogen. Man kann diese Abwandlung der DWD-Gitterwerte als eine erneute Iteration einer Korrektionsmethode zur Berechnung möglichst exakter Druckwerte an den DWD-Gitterpunkten ansehen. Diese Iteration wird mit einer weit größeren Anzahl meteorologischer Daten vorgenommen, als die drei vorhergehenden, mit denen bisher die Bodenluftdruckwerte an den DWD-Gitterpunkten bestimmt wurden. Es werden nun sämtliche Stationen mit synoptischen Bodenluftdruckmeldungen herangezogen, die nach der in Abschnitt 5.1. beschriebenen Überprüfung als richtig erkannt wurden. Der Effekt der Abwandlung soll darin liegen, daß in Gebieten, in denen der gemeldete Druck von dem errechneten Druck an den Gitterwerten stark abweicht eine Anpassung der errechneten Bodenluftdruckwerte an den gemeldeten Druck stattfindet und in Gebieten, in denen die synoptischen Meldungen gut mit den errechneten Gitterwerten übereinstimmen, kaum eine Abwandlung stattfinden soll. Die Abwandlung der Basisdaten (DWD-Gitterwerte) wurde auf zwei verschiedene Arten durchgeführt, die in den Abschnitten 6.1. und 6.2. beschrieben werden. Von den so neu erstellten DWD-Gitterwerten wird dann jeweils nach der Abwandlung auf die Kieler Gitterwerte neu interpoliert. Aus diesen Kieler Gitterwerten

konnte dann mit einem Zeichenprogramm von H. FECHNER die jeweilige Isobarenverteilung aufgezeichnet werden. Damit ist auch eine optische Vergleichsmöglichkeit der einzelnen Analysenergebnisse untereinander möglich.

### 6.1. Die bilineare Methode

In einer ersten Berechnung wurden die DWD-Gitterwerte mit einem in der Meteorologie schon von M. YANAI (1964) benutzten Interpolationspolynom abgewandelt. Mit diesem bilinearen Interpolationspolynom (linear in Bezug auf die x- als auch y-Koordinate) wurden dabei mit einem Korrektionsverfahren Druckanalysen erstellt. Bei der hier vorliegenden Anwendung des bilinearen Interpolationspolynoms wird der Bodenluftdruckwert am Ort der synoptischen Stationsmeldung aus vier die Station umliegenden DWD-Gitterwerten bestimmt. Der so interpolierte Druckwert IP wird durch die DWD-Gitterwerte GW 1 bis GW 4 nach folgender Formel berechnet:

$$(17) \quad IP = GW\ 1 + \bar{x} (GW\ 2 - GW\ 1) + \bar{y} \left( (GW\ 3 - GW\ 1) (1 - \bar{x}) + (GW\ 4 - GW\ 2) \bar{x} \right)$$

Dabei bedeuten  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  Anteile einer gesamten DWD-Gitterlänge in x- bzw. y-Richtung. Die Lage der einzelnen DWD-Gitterwerte entnehmen man aus der Abb. 14.

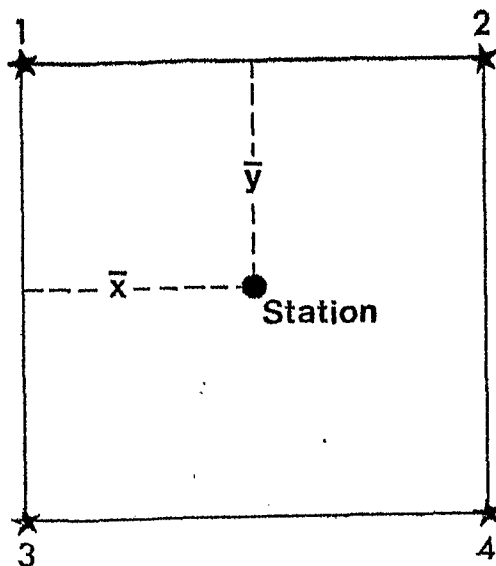


Abb. 14 Hier ist die Anordnung der vier benutzten DWD-Gitterwerte bei der Berechnung der bilinearen Differenzen eingetragen.  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind Anteile einer gesamten DWD-Gitterlänge  $L_x$  bzw.  $L_y$  nach Abb. 8. Sie bestimmen die Entfernung vom Gitterrand zur Station, wobei die Indices 1 bis 4 sich auf die Interpolationsformel 17 beziehen.

Für jede benutzte synoptische Station wird so mit Formel (17) aus den vier sie umliegenden DWD-Gitterpunkten der Bodenluftdruck interpoliert. Danach wird die Differenz zwischen interpoliertem und gemeldeten Wert am Ort der Station berechnet. Sind für sämtliche Stationen die Differenzen berechnet, so werden diese gewichtet und zur Abwandlung der DWD-Gitterwerte herangezogen. Die Wichtung und die Abwandlung der DWD-Gitterwerte ist in Abschnitt 6.2. beschrieben, da diese Berechnungen wie bei der noch folgenden bikubischen Abwandlung vorgenommen werden. Bei der bilinearen Berechnung der Differenzen werden nur 4 DWD-Gitterwerte berücksichtigt. Um den Einfluß weiterer, die synoptische Station umliegender Gitterwerte zu gewährleisten, ist dann in einer erneuten Berechnung der Differenzen das bikubische Interpolationspolynom (16) benutzt worden, um die DWD-Gitterwerte abzuwandeln. Damit werden 16 DWD-Gitterwerte zur Berechnung der Differenzen am Ort der Station herangezogen.

### 6.2. Die bikubische Methode

Hier werden die Differenzen benutzt, die in Abschnitt 5.2. genau beschrieben sind. Für sämtliche benutzten Stationen sind diese Differenzen mit den kartesischen Koordinatenangaben der Stationen gespeichert. Die DWD-Gitterwerte werden dann folgendermaßen abgewandelt: Innerhalb eines Einflußkreises mit dem Radius von 190 km (das entspricht einer DWD-Gitterlänge in der Projektionsebene) um einen DWD Gitterpunkt herum, werden alle Stationen herausgesucht. Die an den Stationen errechneten bikubischen Differenzen werden entfernungsmäßig gewichtet. Die gewichteten Differenzen werden dann aufsummiert und durch die Anzahl der benutzten Stationen innerhalb des Einflußkreises dividiert. So erhält man aus den Abweichungen der umliegenden Stationen um einen Gitterpunkt einen gewichteten Mittelwert. Dieser Mittelwert wird für die Korrektur des DWD-Gitterwertes benutzt. Diese Art der Mittelwertbildung hat fol-





In diesem Beispiel soll der DWD-Gitterwert (5) abgewandelt werden. In seinem Einflußbereich liegen die Stationen A bis D. Die an den Stationen berechneten Differenzen werden gewichtet. Jede dieser Differenzen erhält folgendes unterschiedliches Gewicht W:

$$W = \frac{R^2 - d^2}{R^2 + d^2}$$

mit R = Einflußradius (hier 190 km)

d = Entfernung Station/Gitterpunkt

Ist die Entfernung d größer als der Einflußradius R, so wird die Station nicht bei der Änderung des Gitterwertes berücksichtigt. In Abb. 16 ist die Gewichtsfunktion w in Abhängigkeit von d bei dem hier fest vorgegebenen R = 190 km ersichtlich. Hier im Beispiel beeinflusst so die Station E den Gitterwert 5 nicht mehr. Für diesen Gitterwert setzt sich dann die Korrektur aus den gewichteten Differenzen der Stationen A bis D zusammen. Der neue Gitterwert GW wird dann folgendermaßen bestimmt:

$$GW_{\text{neu}} = GW_{\text{alt}} + \frac{\sum_i w_i \text{Diff}_i}{\sum_i \text{Station}_i} \quad i = A \dots D$$

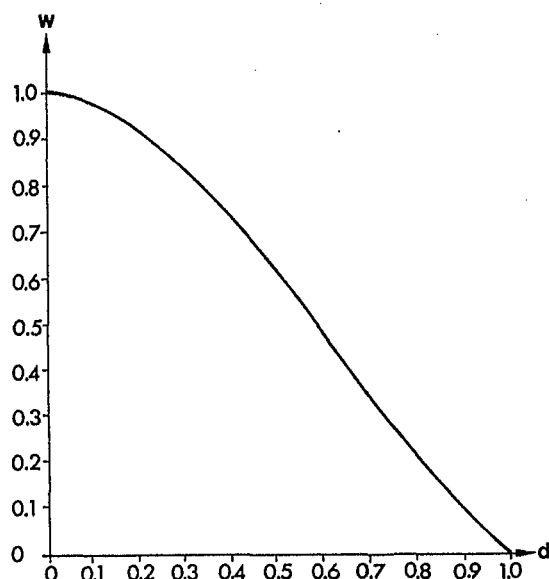


Abb. 16

Hier ist der Wichtungsfaktor w bei einem fest vorgegebenen Einflußradius R = 190 km in Abhängigkeit von d angegeben. Dabei ist d in Einheiten von 0,1 R gewählt worden.

Natürlich beeinflusst z.B. die Station B ebenfalls die Gitterwerte an den DWD-Gitterpunkten 2, 3 und 6. Jedoch wird die gewichtete Differenz durch die verschiedenen Entfernungen  $d$  zu den einzelnen Gitterpunkten unterschiedlich stark sein. Hätte in dem hier betrachteten Beispiel nur die Station B gemeldet, so wäre der DWD-Gitterwert 5 durch die entfernungsmäßig bedingte Wichtung stärker abgewandelt worden als die Werte an den Gitterpunkten 2, 3 und 6.

## 7. ZUSAMMENFASSENDE ERGEBNISSE IM VERGLEICH DER EINZELNEN BERECHNUNGSMETHODEN

Im folgenden sei in einer Diagrammform der Berechnungsweg der einzelnen Methoden für die Kieler Gitterwerte aufgezeigt:

METHODE I: (siehe Abschnitt 4.2.)

Bikubische Interpolation auf das Kieler Gitternetz ohne eine Abwandlung der DWD-Ausgangsdaten:

DWD-Gitterwerte

bikubische Interpolation auf die  
Kieler Gitterpunkte

Isobarenzeichenprogramm

Die Überprüfung der Interpolationsergebnisse (Abschnitt 5.o.) erfolgte nach folgendem Schema:

DWD-Gitterwerte

Synoptische Stationsmeldungen

bikubische Interpolation  
auf die STATIONSKOORDINATEN

Vergleich interpolierter  
minus gemeldeter Druck

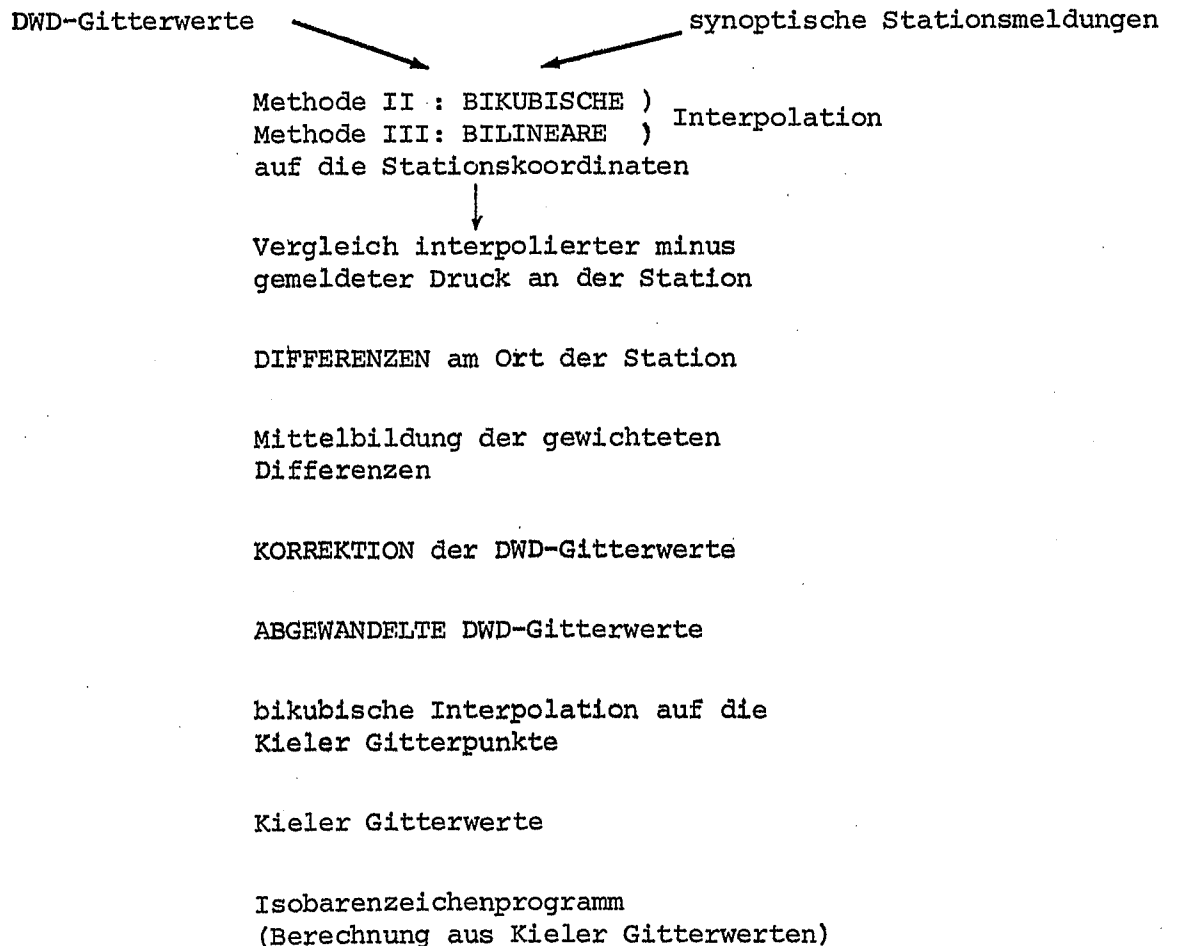
DIFFERENZEN (am Ort der  
Station)

Eintragung der Differenzen  
im Isobarenzeichenprogramm

So ist es möglich, in einem Isobarenzeichenprogramm neben dem Isobarenverlauf auch die berechneten Differenzen zwischen dem berechneten und dem gemeldeten Druck am Ort der Station für einen Berechnungstermin einzeichnen zu können, um sofort einen Überblick zu erhalten, in welchen Gebieten die Analyse dem tatsächlichen Bodendruckfeld nicht exakt entspricht.

METHODE II (Abschnitt 6.2.) bikubische Abwandlung der DWD Daten und

METHODE III (Abschnitt 6.1.) bilineare Abwandlung der DWD Daten:



Die Überprüfung der Interpolationsergebnisse erfolgt dann wie bei der Methode I, jedoch sind dabei die abgewandelten DWD-Gitterwerte die Ausgangsdaten für die Überprüfung an Hand synoptischer Stationsmeldungen.

### 7.1. Überprüfung durch Isobarenzeichnungen

In einer ersten objektiven Güteprüfung der berechneten Ergebnisse läßt sich aus den erstellten Isobarenzeichnungen erkennen, daß beide Abwandlungsmethoden (Methode II und III) gegenüber der rein mathematischen Interpolation (Methode I) deutliche Verbesserungen in den berechneten Kieler Analysen bewirken. In den folgenden Abbildungen sind dabei die Isobaren im Abstand von 1 mb eingezeichnet. Diese Isobarenverläufe errechnen sich aus den Kieler Gitterwerten jeweils mit den Methoden I bis III. Für jede Berechnungsmethode ist für einen Vergleich eine solche Isobarenzeichnung maschinell angefertigt worden (in den Abbildungen mit einem Index am unteren Rand gekennzeichnet). Für die in diesen Zeichnungen ebenfalls eingetragenen berechneten Differenzen am Stationsort wurde folgende Legende verwendet:

- (ohne Vorzeichen) Differenz im Bereich  $-0,5 \text{ mb} < \text{DIFF} < + 0,5 \text{ mb}$
- 1 (mit Vorzeichen) Differenz im Bereich  $0,5 \text{ mb} < \text{DIFF} < 1,0 \text{ mb}$
- 2 (mit Vorzeichen) Differenz im Bereich  $1,0 \text{ mb} < \text{DIFF} < 1,5 \text{ mb}$
- 3 (mit Vorzeichen) Differenz im Bereich  $1,5 \text{ mb} < \text{DIFF} < 2,0 \text{ mb}$
- 4 (mit Vorzeichen) Differenz im Bereich  $2,0 \text{ mb} < \text{DIFF} < 2,5 \text{ mb}$
- 5 (mit Vorzeichen) Differenz im Bereich  $2,5 \text{ mb} < \text{DIFF} < 3,0 \text{ mb}$
- 6 (mit Vorzeichen) Differenz  $= 3,0 \text{ mb}$

Es sind dann typische Wettersituationen untersucht worden. Ein Vergleich zwischen der veröffentlichten DWD-Analyse (Wetterkarte im Maßstab 1:15 Mill) und den Kieler Analysen ist ebenfalls sinnvoll. Folgende Termine mit unterschiedlichen synoptischen Wettersituationen werden zu diesem Zweck als Beispiele herausgegriffen:

1. BEISPIEL Termin: 01.04.1975 06.00 Uhr (Abb. 17)

Wetterlage: In Nordeuropa ist ein skandinavisches Tiefdrucksystem wetterbestimmend. Dieses Tiefdrucksystem vertieft sich im Laufe des Tages, wobei seine Frontausläufer über Jütland und Schleswig-Holstein süd-ostwärts ziehen. Ebenso

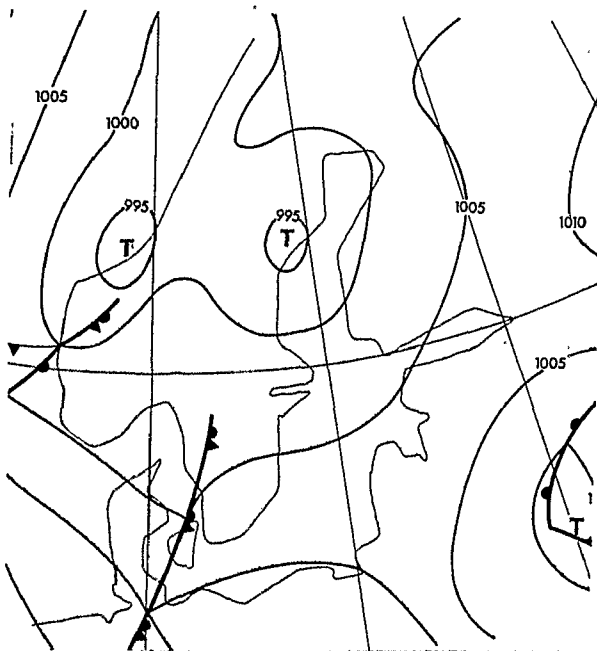
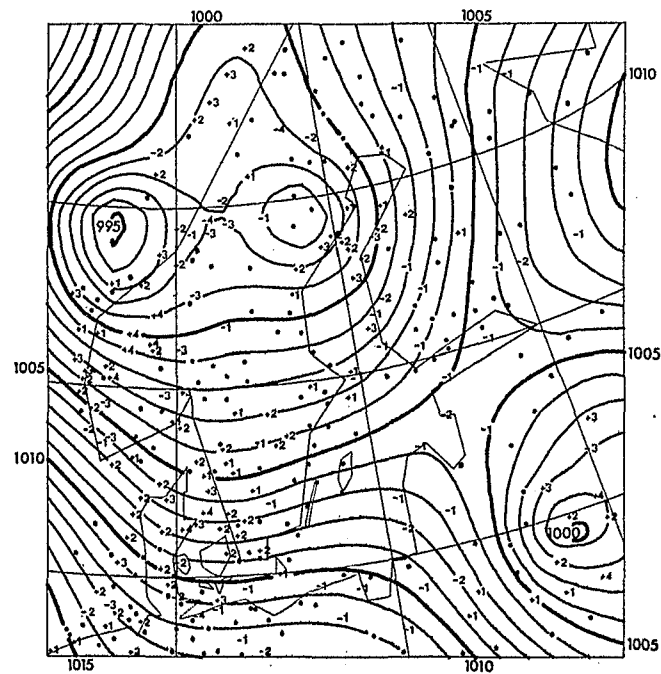
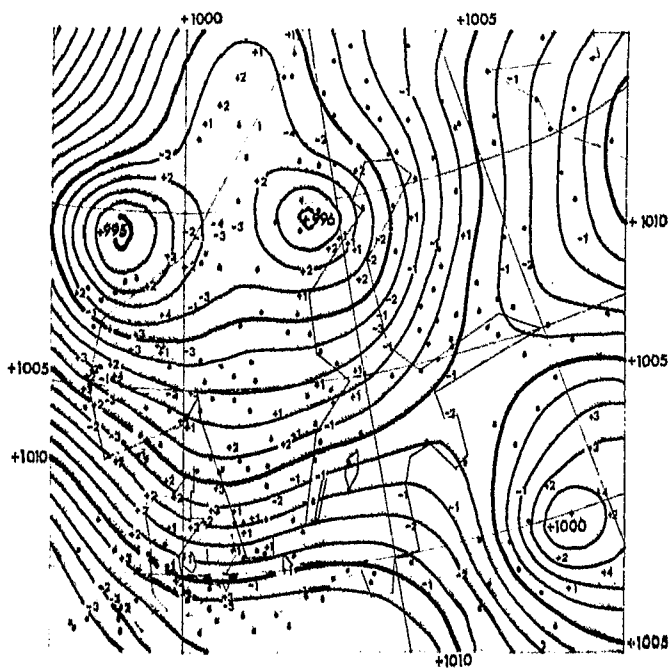


Abb. 17 DWD-Bodenluftdruckanalyse vom 01.04. 06.00 Uhr



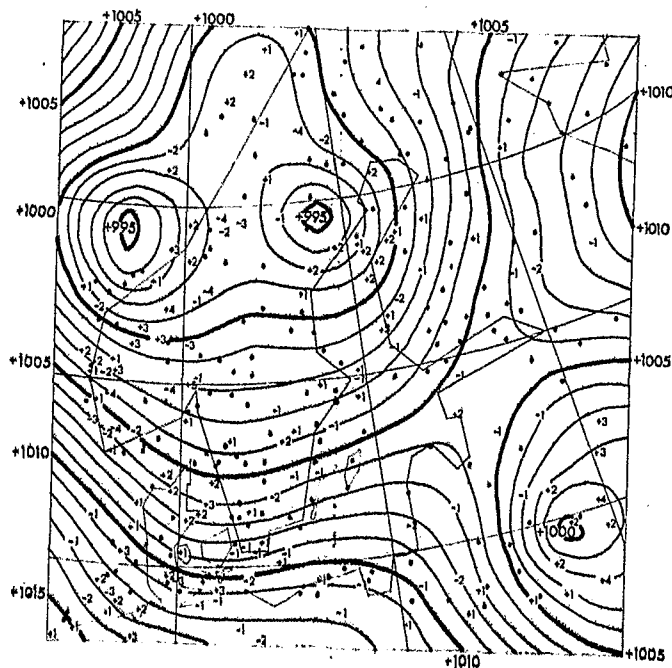
I 1.475 6 Uhr

Abb. 18a Analyse der Kieler Gitterwerte 01.04. 06.00 Uhr  
Berechnungsmethode I



II 1.475 6 Uhr

Abb. 18b Analyse der Kieler Gitterwerte 01.04. 06.00 Uhr  
Berechnungsmethode II



III 1.475 6 Uhr

Abb. 18c Analyse der Kieler Gitterwerte 01.04. 06.00 Uhr  
Berechnungsmethode III

verlagert sich eine ausgeprägte Okklusionsfront von Mittelschweden süd-ostwärts. Um 12.00 Uhr reicht diese Okklusionsfront von der Ostküste Schwedens über Rügen weit nach Deutschland. Diese Wetterlage ist typisch für eine stark zyklonale Wettersituation, wobei sich die Fronten im weiteren zeitlichen Verlauf in das Ostseegebiet verlagern. In diesem Beispiel sind drei Fronten im Analysengebiet zu finden.

Vergleich der Analysen (Abb. 18a, 18b, 18c).

In der Abbildung 18a ist erkennbar, daß die beiden Kerne des norwegischen Tiefdrucksystemes nur schwach ausgebildet sind. In den Abbildungen 18b und 18c sind diese Kerne jedoch eindeutig stärker sichtbar getrennt. Im östlichen Kern verkleinern sich die dort berechneten positiven Differenzen von +3 bzw. +2 mit den Methoden II und III um 0,5 mb auf +2 bzw. +1. Auch in Südschweden werden nach der Abwandlung der DWD-Gitterwerte kleinere Differenzen an den Stationen berechnet. Im Gegensatz zu der DWD-Analyse (Abb. 17) ist in allen drei Kieler Analysen das über der nordwestlichen Sowjetunion liegende Tiefdruckgebiet im Kerndruck 1000 mb nicht in dieser Ausbreitung analysiert. Im Bereich der Okklusionsfront (östlich von Jütland) treten bei allen drei Kieler Analysen größere Differenzen bis zu 2,0 mb auf, die sich jedoch bei der Berechnung mit den Methoden II und III verkleinern. Im Gegensatz zur DWD-Analyse verläuft hier in allen drei Fällen die 1005 mb Isobare (ohne Isobärenknick) weiter im Norden und erreicht nicht die Insel Seeland.

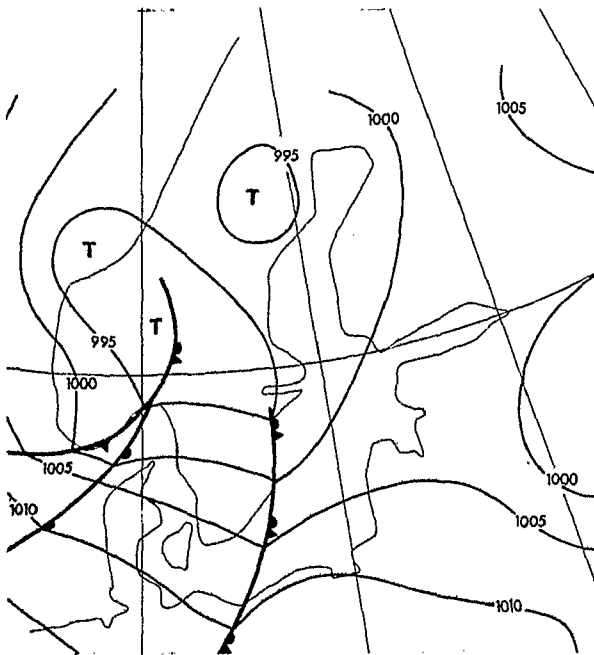
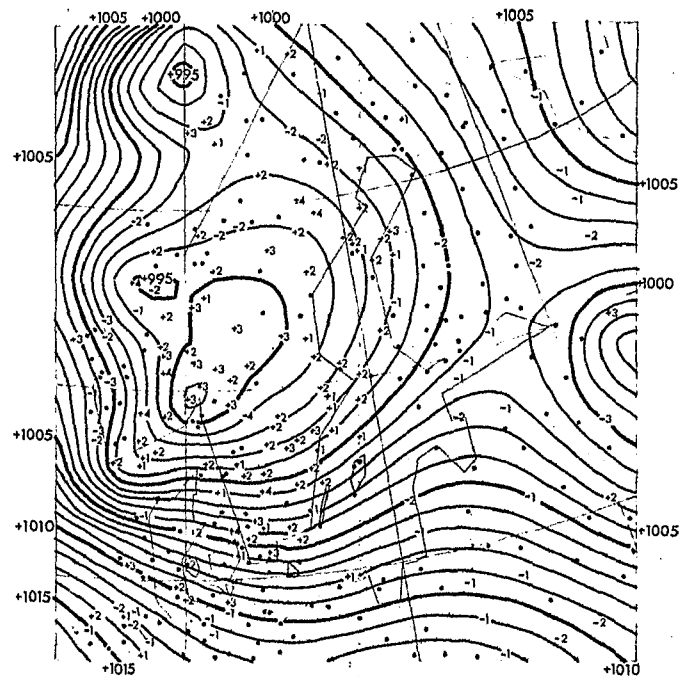
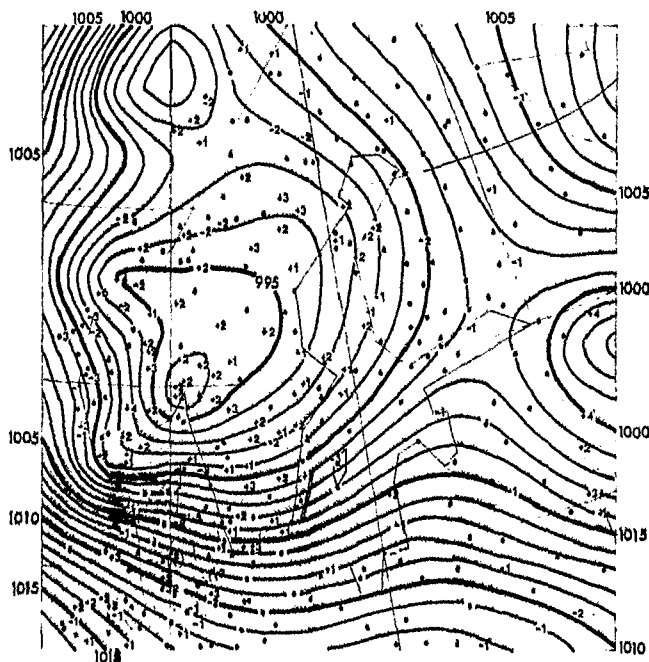


Abb. 19 DWD-Bodenluftdruckanalyse  
vom 01.04. 12.00 Uhr



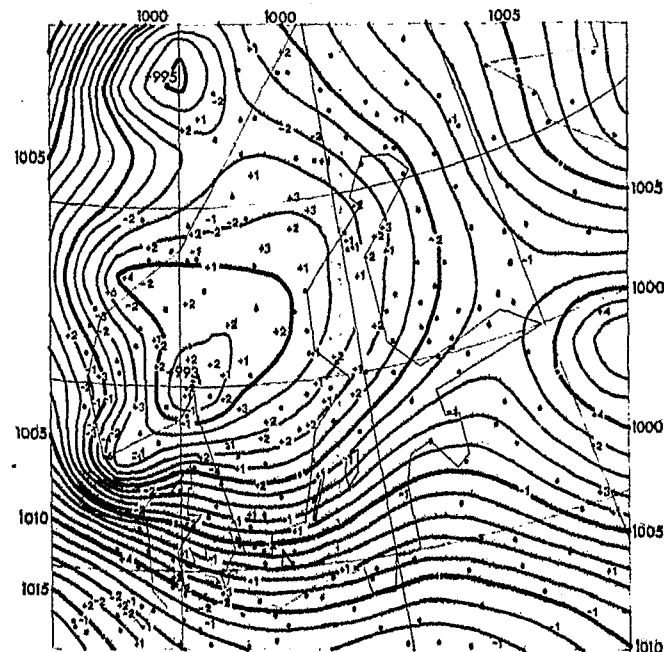
I 1.4.75 12 Uhr

Abb. 20a Analyse der Kieler Gitter-  
werte 01.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode I



II 1.4.75 12 Uhr

Abb. 20b Analyse der Kieler Gitter-  
werte 01.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode II



III 1.4.75 12 Uhr

Abb. 20c Analyse der Kieler Gitter-  
werte 01.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode III

2. BEISPIEL Termin: 01.04.1975 12.00 Uhr (Abb. 19)

Wetterlage: siehe 01.04.1975 06.00 Uhr

Vergleich der Analysen (Abb. 20a, 20b, 20c)

Im ausgeprägten Frontensystem über Südwestnorwegen sind bei allen drei Analysen die Differenzen groß. Der Tiefdruckkern wird mit den Methoden II und III besser angepaßt und vergrößert sich. Das Tiefdruckgebiet nördlich der Lofoten ist in der DWD-Analyse nicht analysiert, entspricht aber den synoptischen Stationsmeldungen in diesem Gebiet. Die starken Isobarenknick an der Okklusionsfront in der DWD-Analyse sind in den Kieler Analysen nicht wiederzufinden. Die dort berechneten Differenzen sind jedoch gering. Besonders im Bereich des Bornholmbeckens findet man eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemeldeten und berechneten Druckwert (siehe Differenzenkennzeichnung • ).

3. BEISPIEL Termin: 16.04.1975 12.00 Uhr (Abb. 21)

Wetterlage: Das Wetter in Westeuropa wird bestimmt von einem starken Tiefdruckgebiet über dem Atlantik und einer sich aufbauenden Antizyklone über Skandinavien. Um 00.00 Uhr liegt vor der deutschen Küste noch eine Kaltfrontokklusion, die dann um 06.00 Uhr ganz aus dem Ostseegebiet nach Süden gewandert ist. Somit ist über dem gesamten Ostseebereich zum Analysentermin keine Front zu finden. Die vorhandenen Luftdruckgegensätze sind sehr schwach. Dieses Beispiel kann als typisch für eine antizyklonale Wetterlage angesehen werden.

Vergleich der Analysen (Abb. 22a, 22b, 22c)

Charakteristisch für diesen untersuchten Termin ist die in weiten Gebieten gute Anpassung des errechneten an den gemeldeten Druck. In den Kieler Analysen ist die Ausbreitung des Hochdruckgebietes über Westnorwegen nicht wie in der DWD-Analyse bis zum Bottnischen Meerbusen mit der Isobare 1015 mb gegeben. Der sonstige Verlauf der errechneten



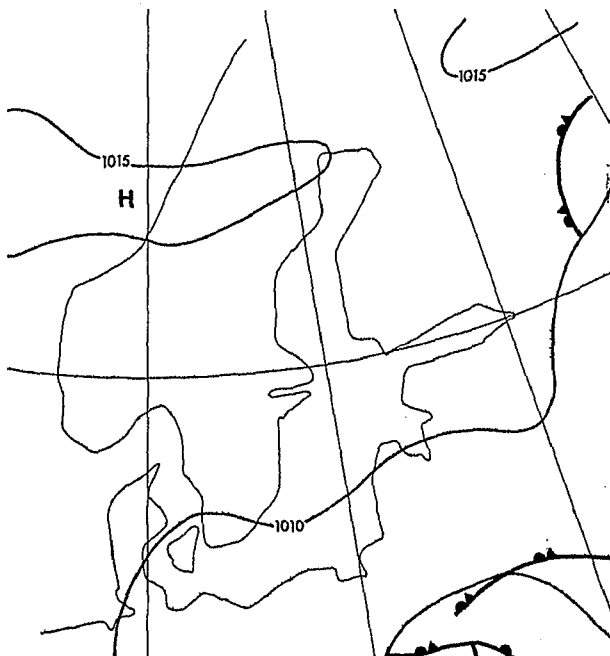
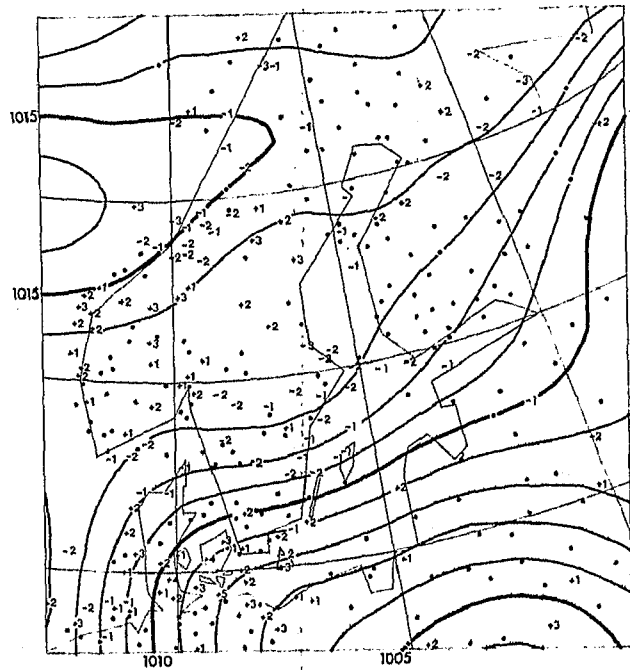
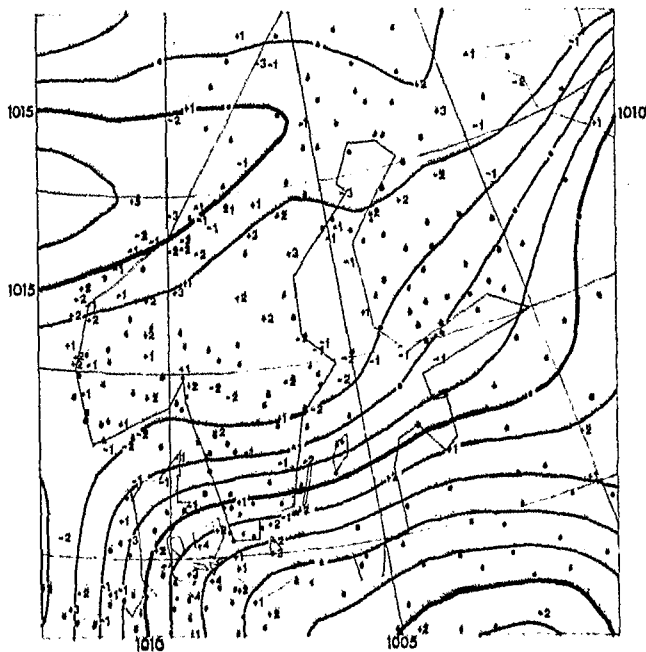


Abb. 21 DWD-Bodenluftdruckanalyse  
vom 16.04. 12.00 Uhr



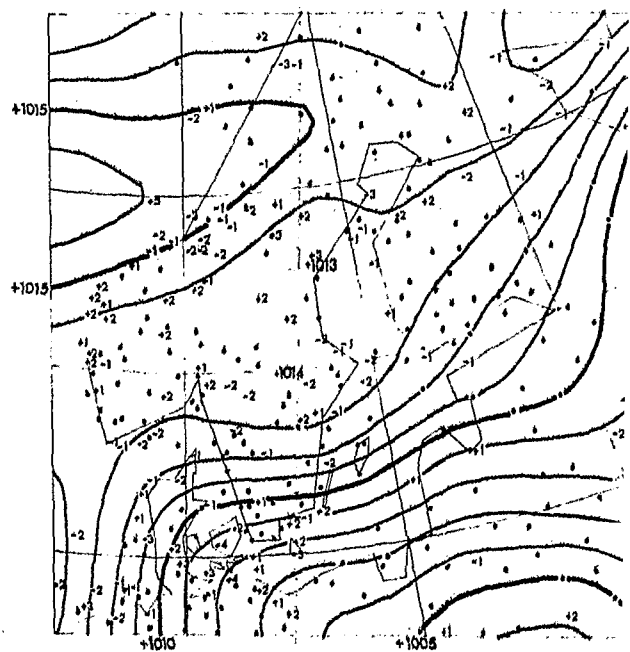
I 16.4.75 12 Uhr

Abb. 22a Analyse der Kieler Gitterwerte 16.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode I



II 18.4.78 12 Uhr

Abb. 22b Analyse der Kieler Gitter-  
werte 16.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode II



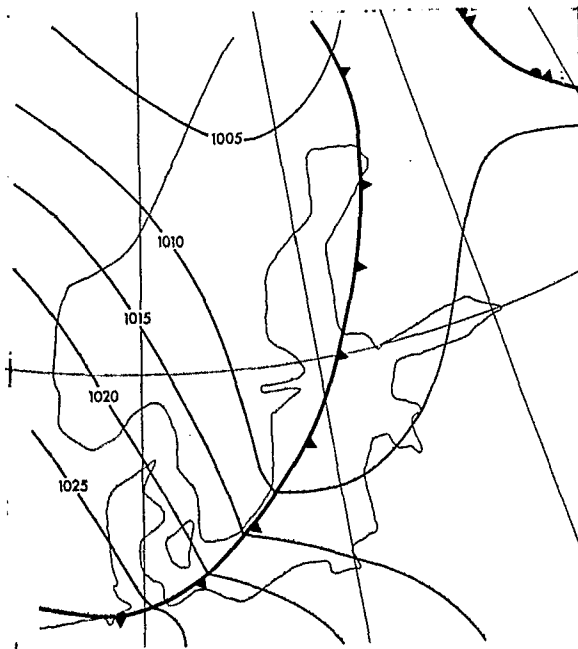
III 16.4.75 12 Uhr

Abb. 22c Analyse der Kieler Gitter-  
werte 16.04. 12.00 Uhr  
Berechnungsmethode III

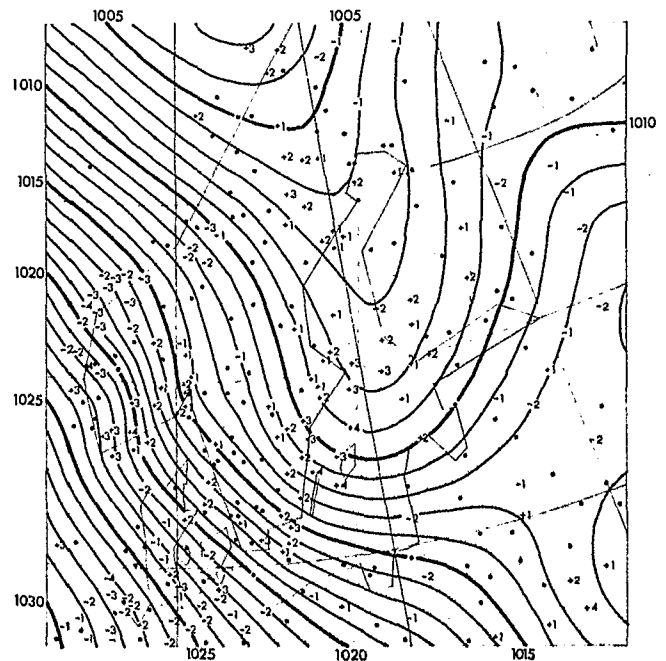
1015 mb Isobare entspricht dem Verlauf der Analyse des DWD. Im Bereich der norwegischen Küste und über den westlichen dänischen Inseln errechnen sich die größten Differenzen. Nach Anwendung der Berechnungsmethoden II und III der Kieler Analysen werden diese jedoch verringert. Eine Ausnahme bildet dabei eine Station in  $10^{\circ}\text{E}$   $65^{\circ}\text{N}$ , bei der sich eine größere Differenz +5 (entspricht 2,5 mb) berechnet. Der errechnete Druckwert hat sich dabei durch die Berücksichtigung der vielen negativen Differenzen weiter östlich gelegener Stationen erhöht. Die in Methode I berechnete positive Differenz an dieser Station (Schiffsmeldung) fällt auch aus dem Rahmen der sonst systematisch angeordneten negativen Differenzen an der norwegischen Küste.

4. BEISPIEL Termin: 24.04.1975 06.00 Uhr (Abb. 23)

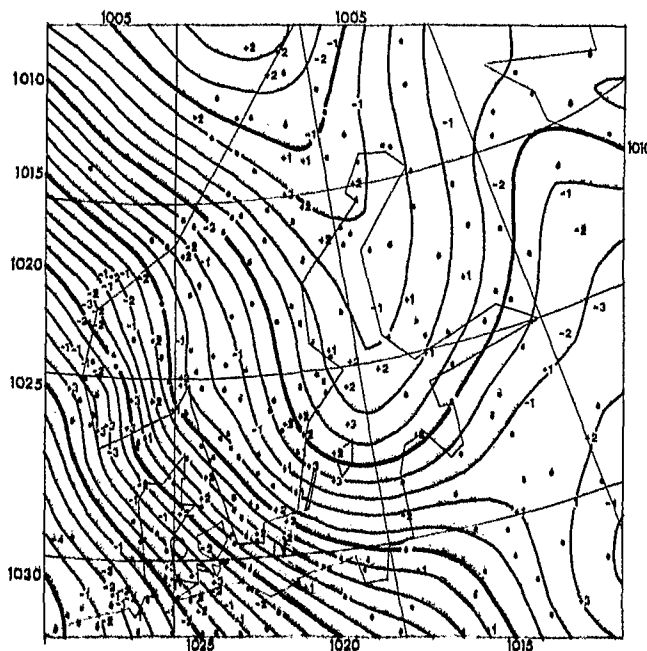
Wetterlage: Westlich von Großbritannien hat sich eine Hochdruckzelle verstärkt. Über dem nördlichen Skandinavien liegt ein umfangreiches Tiefdrucksystem, dessen Kaltfront von Nordostnorwegen bis an die Küste Polens reicht und von dort über Schleswig-Holstein Anschluß an die Warmfront eines Grönländischen Tiefdrucksystems findet. Im Bereich dieser Front entsteht im Tagesverlauf im Gebiet des Lettischen Meerbusens ein neues Teiltief. Dadurch sind sehr große Luftdruckgegensätze über Nordeuropa vorhanden. Im westlichen Teil des Analysengebietes ist eine sehr starke Isobarendrängung zu verzeichnen. Dieses Beispiel ist typisch für eine zyklonale Wetterlage mit einer stark ausgeprägten Front im Bereich der Ostsee, wobei markante Isobarenknicke auftreten.



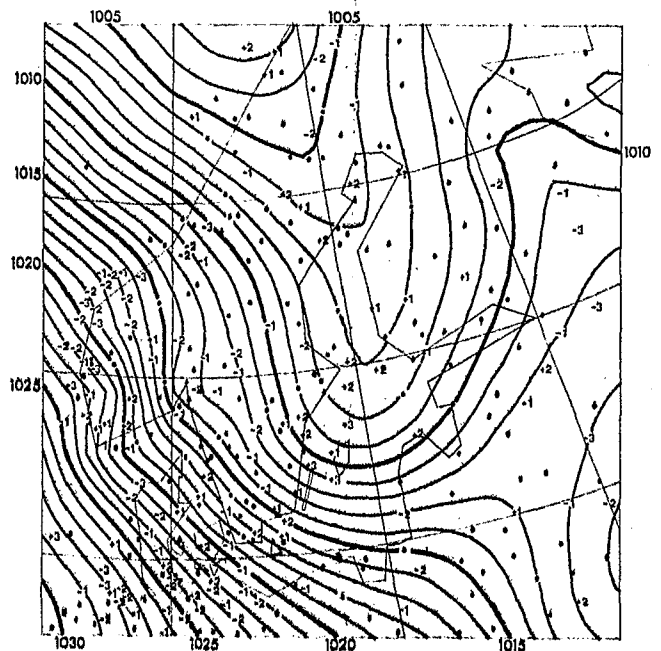
**Abb. 23** DWD-Bodenluftdruckanalyse  
vom 24.04. 06.00 Uhr



**I** 24.4.75 6Uhr



**II** 24.4.75 6Uhr



**III** 24.4.75 6Uhr

**Abb. 24b** Analyse der Kieler Gitter-  
werte 24.04. 06.00 Uhr  
Berechnungsmethode II

**Abb. 24c** Analyse der Kieler Gitter-  
werte 24.04. 06.00 Uhr  
Berechnungsmethode III

Vergleich der Analysen (Abb. 24a, 24b, 24c):

Über Westnorwegen ist in allen drei Analysenmethoden der errechnete Bodenluftdruck gegenüber der DWD-Analyse zu niedrig. Bedingt durch orographische Effekte (starke Anströmung an die Norwegische Küstengebirge) ist anzunehmen, daß die dort gemeldeten Küstenstationen einen zu hohen Bodenluftdruck gemeldet haben (negative Differenzen). Die Analysenmethoden II und III verbessern auch hier die Bodenluftdruckwerte um durchschnittlich 0,5 mb und bewirken somit eine bessere Anpassung der Analyse an das gegebene Bodenluftdruckfeld. Der Verlauf der Hauptisobaren stimmt gut mit der DWD-Analyse überein. Lediglich im Bereich der Kaltfront sind die Isobarenknicke nicht ausgeprägt. Dies gilt vor allem in den drei Analysen für den südlichen Teil der Front. Hinter der Front errechnen sich positive Differenzen. Über dem deutschen Festland (vor der Front) treten negative Differenzen auf. Zieht man die Überlegungen von Abschnitt 5.3. (Bedeutung der Differenzen heran), so ist durch den Vergleich mit der DWD-Handanalyse ein tatsächlicher Fall des in Abschnitt 5.3. angegebenen Beispiels hier zu finden.

## 7.2. Fehlerbetrachtung der Analysenergebnisse

In der folgenden Untersuchung ist mit den an synoptischen Stationen berechneten Differenzen DIFF (siehe Abschnitt 5.2.) der mittlere quadratische Fehler  $\sigma$  für das gesamte Analysengebiet gebildet worden. Folgende Formel wurde dazu benutzt:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N \text{DIFF}_i^2}{N - 1}$$

$N$  = Anzahl der benutzten Stationen, an denen DIFF berechnet wurde, DIFF = berechneter minus gemeldeter Druckwert an der Station:

Dieser mittlere Fehler  $\sigma$  ist ein Maß für die Güte der Anpassung der berechneten Analyse im gesamten Analysenbereich an die gemeldeten Druckverhältnisse. Ist der Fehler groß, so ist die Analyse nicht den wahren Verhältnissen so gut

angepaßt, als wäre der mittlere quadratische Fehler klein. Es sollte festgestellt werden, ob dieser Fehlerwert  $\sigma$  in Verbindung zu einer typischen Wettersituation (zyklonale bzw. antizyklonale Wetterlage) charakteristische Werte annimmt. Zum weiteren ist dabei von Interesse, wie stark durch die Berechnungsmethoden II und III eine bessere Anpassung der Analyse an das Bodenluftdruckfeld bewirkt wird. Diese Anpassung würde eine Verkleinerung des mittleren quadratischen Fehlers  $\sigma$  bewirken.

Mit den Ergebnissen, zusammengefaßt in Tabelle II am Ende dieser Betrachtungen, kann man nach einer Untersuchung der repräsentativen Termine der Beispiele aus Abschnitt 7.1. zu folgenden Schlüssen kommen:

1. In zyklonalen Wetterlagen (Tabelle II, Teil 1 und 3) steigt der mittlere quadratische Fehler beim Durchzug von Fronten durch das Analysengebiet an und sinkt nach dem Frontdurchgang wieder ab. Je mehr Fronten im Analysengebiet liegen, desto größer wird der mittlere quadratische Fehler.  
(Tabelle II, Teil 1 siehe auch Abb. 17, 19     3 Fronten  
Teil 3 siehe auch Abb. 23     1 Front)
2. In antizyklonalen Wetterlagen (Tabelle II, Teil 2) variiert der mittlere quadratische Fehler  $\sigma$  im Verlauf mehrerer Berechnungstermine nur sehr gering und erreicht nicht die Größe wie in stark zyklonalen Wettersituationen.
3. Beide Analysenergebnisse nach den Berechnungsmethoden II und III verbessern den Fehlerwert  $\sigma$  erheblich, sowohl bei zyklonaler als auch bei antizyklonaler Wettersituation. Dies spricht für genauere Analysen des Bodenluftdruckes nach einer Abwandlung der DWD-Gitterwerte (siehe Abschnitt 6).

Durch eine solche Fehlerbetrachtung kann keine gute Darstellung über die räumliche Verteilung des mittleren quadratischen Fehlers im Analysengebiet gegeben werden. Um darüber eine genauere Aussage zu erhalten, ist der mittlere quadratische Fehler in jedem DWD-Gitterquadrat, in dem Stations-

meldungen vorhanden waren, bestimmt worden.

$$\sigma^+ = \frac{\sum_{i=1}^n \text{DIFF}^2}{n - 1}$$

n = Anzahl der Stationen  
pro DWD-Gitterquadrat

Man kann dabei davon ausgehen, daß gerade in Gebieten der DWD-Gitterquadrate, durch die eine Front verläuft, große Differenzen DIFF berechnet werden und damit der mittlere quadratische Fehler dort groß sein wird. Für die einzelnen Termine aus den Beispielen 1 bis 4 aus Abschnitt 7.1. sind für diese unterschiedlichen Wetterlagen die mittleren quadratischen Fehler pro DWD-Gitterquadrat in den folgenden Abbildungen 25-28a,b,c durch Symbole eingetragen worden. Dabei wurde folgende Legende benutzt:

Die Anzahl der Stationen n pro DWD-Gitterquadrat ist für jeden Termin rechts oben in den DWD-Gitterquadraten eingetragen. In gerasterten Feldern hat keine Station den Druck gemeldet. In DWD-Gitterquadraten, in denen kein Symbol vermerkt wurde, ist der berechnete Fehlerwert sehr gering (< 0,5 mb). Für die übrigen Symbole wurde folgende Einteilung getroffen:

■	0,5	<	$\sigma^+$	<	0,75	mb
□	0,75	<	$\sigma^+$	<	1,0	mb
▲	1,0	<	$\sigma^+$	<	1,25	mb
△	1,25	<	$\sigma^+$	<	1,5	mb
●	1,5	<	$\sigma^+$	<	1,75	mb
○	1,75	<	$\sigma^+$	<	2,0	mb
◆	2,0	<	$\sigma^+$	<	2,25	mb
◇	2,25	<	$\sigma^+$	<	2,5	mb

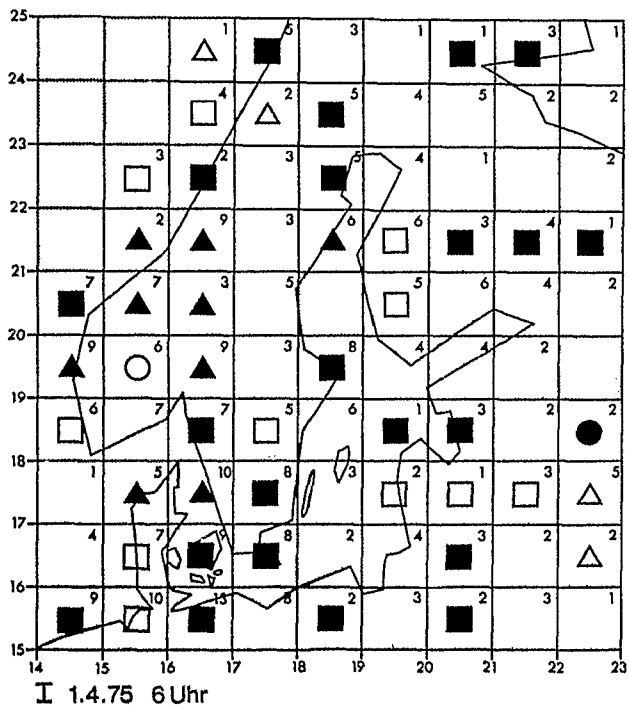


Abb. 25a

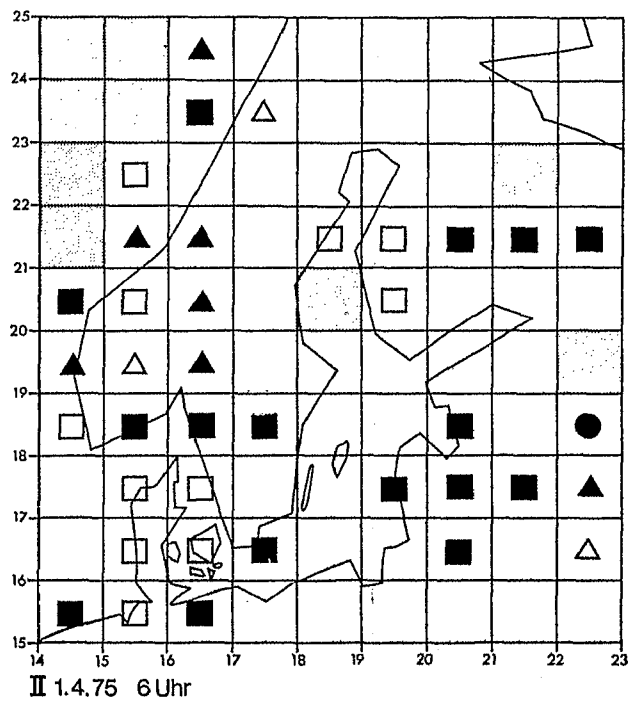


Abb. 25b

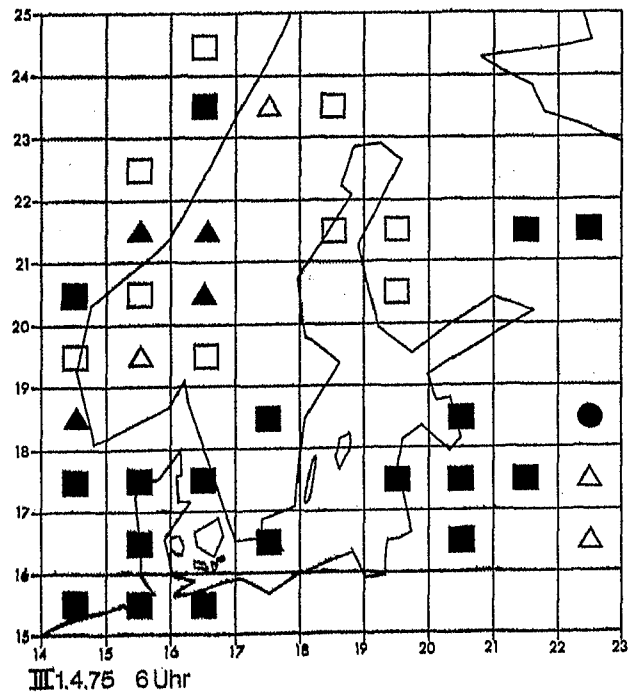


Abb. 25c

Abbildungen 25a, b, c      Termin 01.04.1975    06.00 Uhr

In den Druckkernen des norwegischen Tiefdruckgebietes und an den Frontausläufern dieses Systems (siehe Abb. 17) berechnen sich erwartungsgemäß hohe Werte des mittleren quadratischen Fehlers. In diesen grafischen Darstellungen ist aber deutlich ersichtlich, wie der mittlere quadratische Fehler in den einzelnen DWD-Gitterquadraten durch die Berechnungsmethoden II und III vermindert wird. Sind bei der Berechnung mit der Methode I noch im Bereich der Front über Westnorwegen Fehlergrößen bis zu 2,0 mb ( $x = 15$ ,  $y = 19$ ) zu finden, so ist nach den Berechnungsmethoden eine Reduzierung des Fehlerwertes um bis zu 0,75 mb zu erkennen. Weiterhin ist auffällig, daß in vielen DWD-Gitterquadraten der Fehlerwert von 0,5 bis 0,75 mb unter den Fehlerwert 0,5 mb vermindert wird.

Abbildungen 26a, b, c      Termin 01.04.1975    12.00 Uhr

Deutlich kann hier durch den mittleren quadratischen Fehler pro DWD-Gitterquadrat der Verlauf der Okklusionsfront an der Ostküste Schwedens erkannt werden. Speziell in diesem Bereich ist nach den Analysenberechnungen mit den Methoden II und III eine bessere Anpassung an das tatsächliche Bodendruckfeld bewirkt worden. Im Bereich der starken Frontausläufer über Südwestnorwegen treten in diesen Analysen die größten Abweichungen zwischen berechnetem und gemeldetem Druck auf. Innerhalb der DWD-Gitterquadrate ergeben sich so große Fehlerwerte.



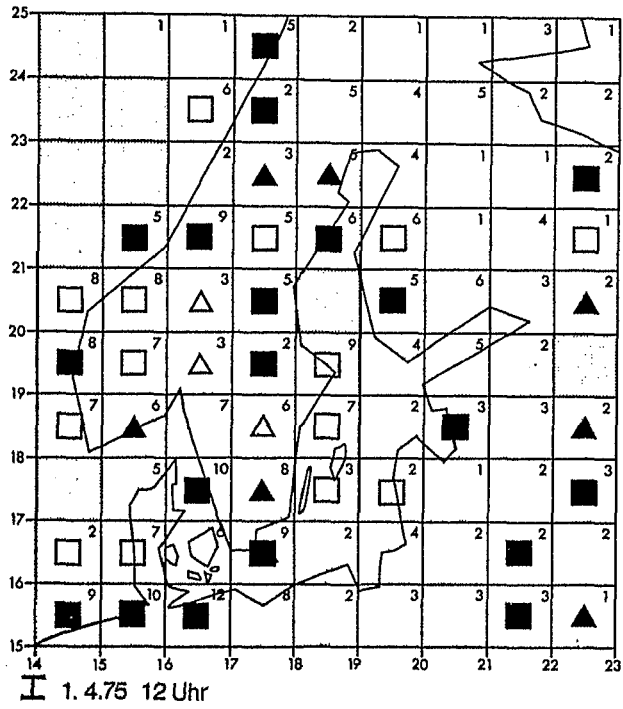


Abb. 26a

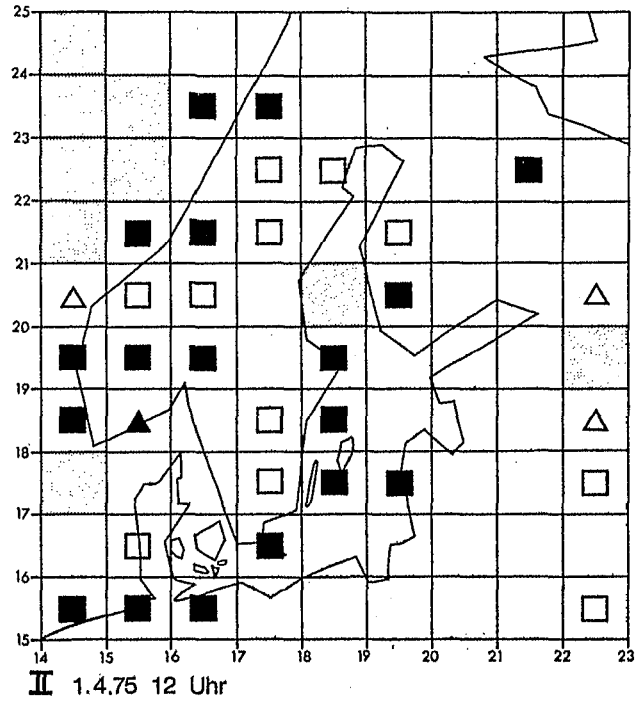


Abb. 26b

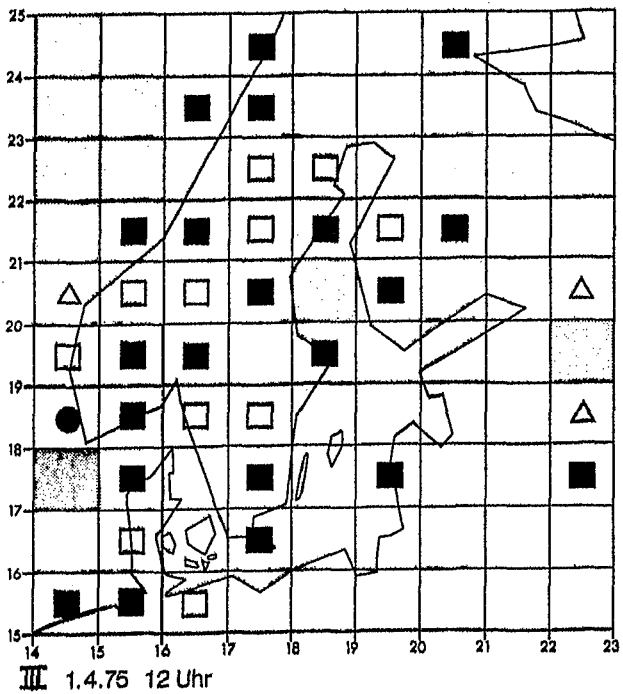


Abb. 26c

Abbildungen 27a, b, c      Termin 16.04.1975      12.00 Uhr

Über dem gesamten Analysengebiet ist der mittlere quadratische Fehler in den einzelnen DWD-Gitterquadraten gering. Dies trifft für alle drei Berechnungsmethoden zu. Durch die Berechnungsmethoden II und III kann jedoch noch eine weitere Verringerung bewirkt werden. Der große Fehler von 2,25 mb im DWD-Gitterquadrat mit den Koordinaten  $x = 15$ ,  $y = 22$  ist auf die Schiffsmeldung zurückzuführen, die wie bereits bei der Diskussion der Isobatenverläufe (Abschnitt 7.1.) besprochen, zu stark von den norwegischen Küstenstationen beeinflusst wird. In diesem DWD-Gitterquadrat gibt es auch nur diese einzige Meldung.

Abbildungen 28a, b, c      Termin 24.04.1975      06.00 Uhr

Im Bereich der Kaltfront treten hier die größten mittleren quadratischen Fehler auf. Durch die Berechnungsmethoden II und III werden diese Fehler ebenfalls durchschnittlich um 0,5 mb in vielen DWD-Gitterquadraten verringert. Während durch die Einzeichnung der Fehlersymbole bei der Methode I die Kaltfront deutlich durch die größeren Abweichungen sichtbar wird, wird die Anpassung der Analyse an das Bodenluftdruckfeld mit den Methoden II und III so günstig, daß die Lage der Front nicht mehr eindeutig erkennbar ist. Bemerkenswert, daß an diesem untersuchten Termin der mittlere quadratische Fehler über der Küste von Westnorwegen eindeutig höher ist als im übrigen Analysengebiet.

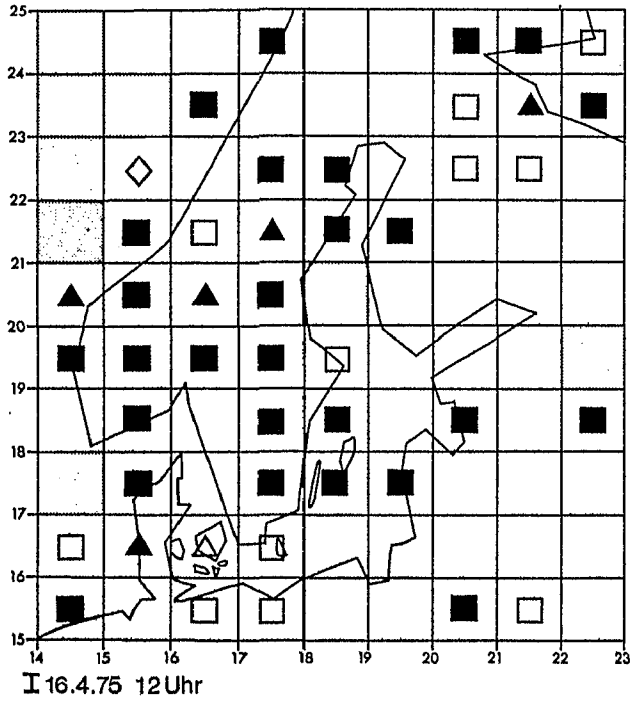


Abb. 27a

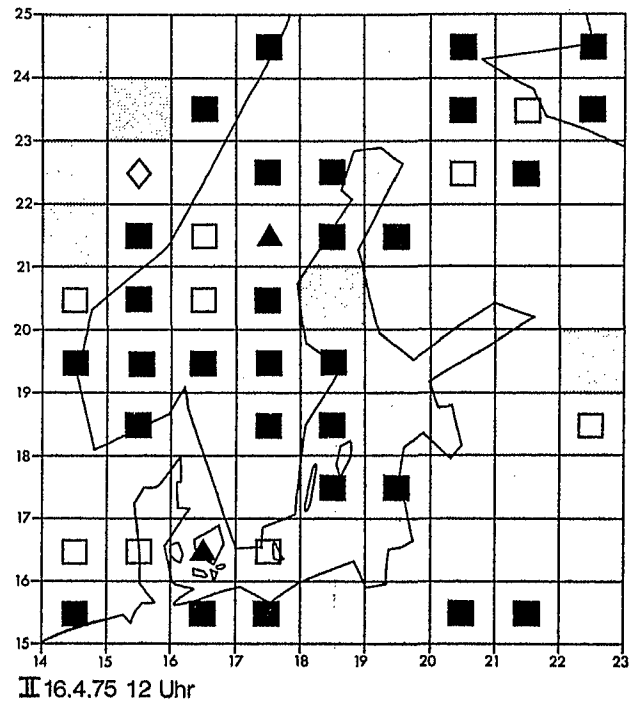


Abb. 27b

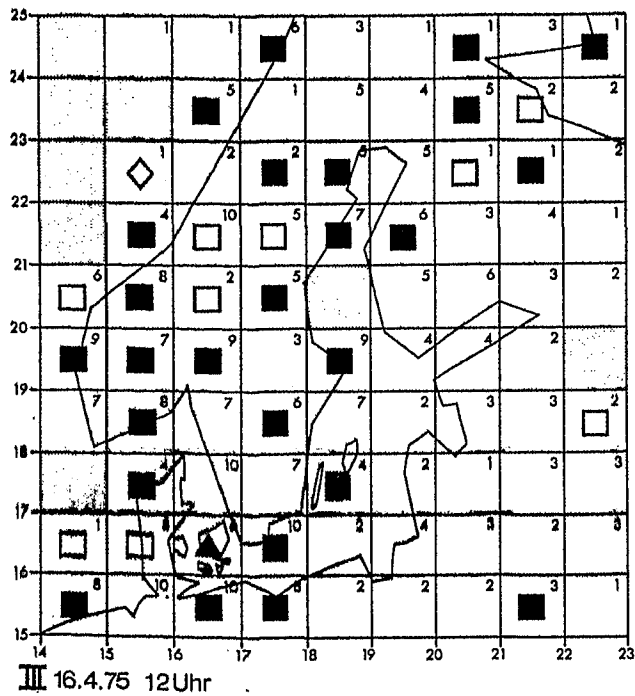


Abb. 27c

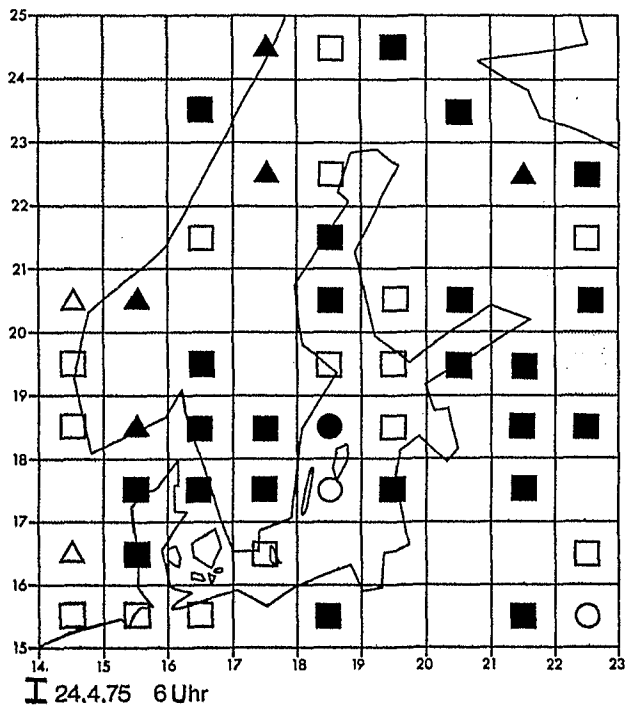


Abb. 28a

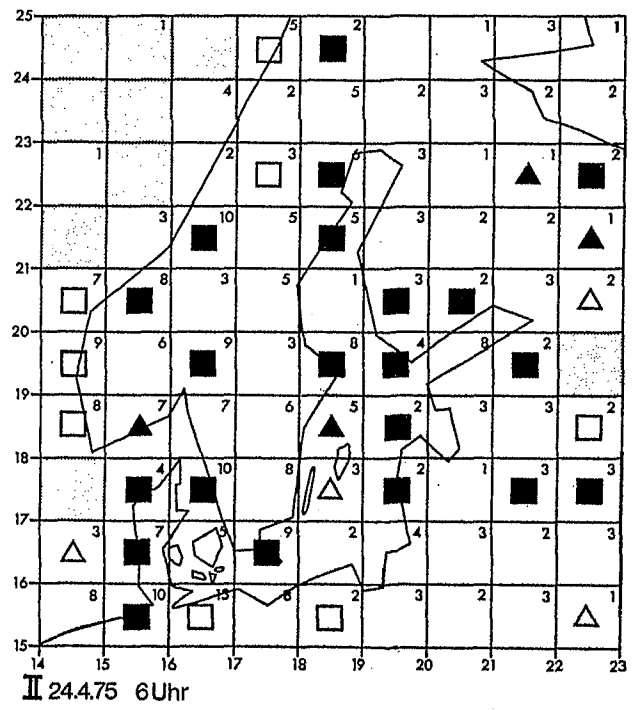


Abb. 28b

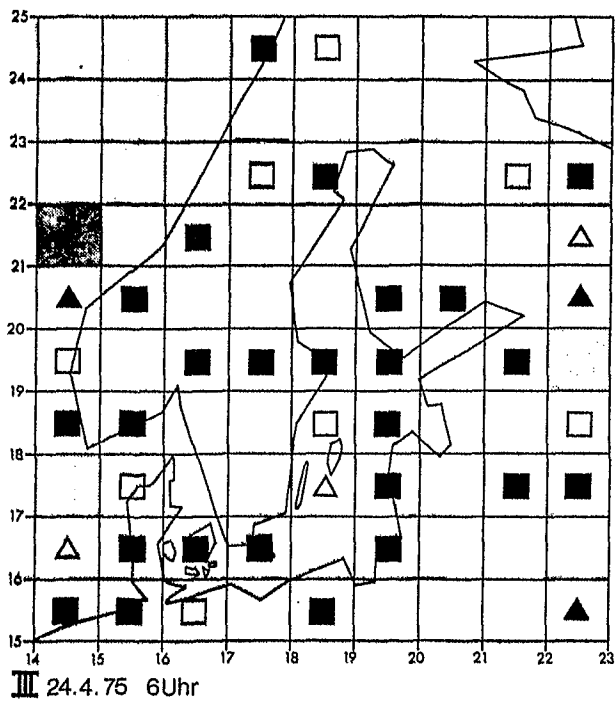


Abb. 28c

Aus den mittleren quadratischen Fehlern  $\sigma^+$  pro DWD-Gitterquadrat ist dann zum Abschluß der Mittelwert  $\bar{\sigma}$  für den gesamten Analysenbereich erstellt worden

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma^+}{N}$$

N = Anzahl der DWD-Gitterquadrate, in denen Stationen gemeldet haben

Dieser gemittelte mittlere quadratische Fehler ist ebenso wie der mittlere quadratische Fehler  $\sigma$  ein Wert für die Anpassung der berechneten Analyse an die tatsächlich gemeldeten Druckverhältnisse. Es sollte hiermit überprüft werden, ob die Tendenz, die Analyse mit den Berechnungsmethoden II und III zu verbessern, auch hierdurch bestätigt wird.

In der folgenden Tabelle II sind im Vergleich für repräsentative Wetterlagen berechnete Fehlerwerte für jede Berechnungsmethode aufgestellt. Die untersuchten Beispiele aus Abschnitt 7.1. sind dabei mit einbezogen.

TABELLE II

DATUM	STATIONSANZAHL	mb $\sigma$	mb MITTELWERT $\bar{\sigma}$	METHODE
<u>TEIL 1 (zyklonale Wetterlage 3 FRONTEN IM ANALYSENGEBIET)</u>				
01.04.00	279	0,69	0,48	I
	279	0,59	0,35	II
	279	0,58	0,35	III
01.04.06 (Abb. 17)	336	0,77	0,49	I
	336	0,67	0,38	II
	336	0,66	0,37	III
01.04.12 (Abb. 19)	342	0,72	0,33	I
	343	0,65	0,31	II
	343	0,66	0,31	III
01.04.18	341	0,80	0,58	I
	341	0,68	0,44	II
	341	0,71	0,46	III
02.04.00	275	0,85	0,58	I
	275	0,69	0,38	II
	275	0,64	0,38	III
02.04.06	332	0,81	0,49	I
	332	0,64	0,34	II
	333	0,63	0,31	III
02.04.12	339	0,77	0,49	I
	339	0,64	0,34	II
	339	0,59	0,31	III
02.04.18	343	0,67	0,37	I
	343	0,57	0,26	II
	343	0,59	0,27	III

DATUM	STATIONSANZAHL	mb $\sigma$	mb MITTELWERT $\bar{\sigma}$	METHODE
-------	----------------	----------------	---------------------------------	---------

TEIL 2 (antizyklonale Wetterlage)

16.04.00	270	0,67	0,54	I
	270	0,56	0,36	II
	270	0,54	0,33	III
16.04.06	330	0,72	0,56	I
(Abb. 25)	330	0,59	0,35	II
	330	0,58	0,33	III
16.04.12	343	0,66	0,40	I
(Abb. 21)	343	0,59	0,33	II
	343	0,58	0,33	III
16.04.18	339	0,61	0,32	I
	340	0,56	0,25	II
	340	0,55	0,25	III

TEIL 3 (zyklonale Wetterlage 1 Front)

24.04.00	276	0,66	0,37	I
	276	0,58	0,26	II
	276	0,57	0,26	III
24.04.06	321	0,78	0,47	I
(Abb. 23)	321	0,62	0,34	II
	321	0,61	0,31	III
24.04.12	344	0,79	0,50	I
	344	0,67	0,37	II
	344	0,65	0,35	III
24.04.18	343	0,76	0,44	I
	342	0,60	0,37	II
	343	0,65	0,35	III
25.04.00	275	0,77	0,67	I
	275	0,64	0,46	II
	275	0,63	0,45	III

Da die verbesserten Analyseergebnisse sowohl mit der Berechnungsmethode II (bikubische Abwandlung der DWD-Gitterwerte) als auch mit der Berechnungsmethode III (bilineare Abwandlung) erreicht wurden, sollte nun festgestellt werden, welche dieser Methoden für eine Analyse, wie sie hier erstellt wird, vorteilhafter ist. An einem Beispiel soll hier deutlich gemacht werden, wie die einzelnen Abwandlungsmethoden die Werte an den DWD-Gitterpunkten ändern und sich dann daraus eine neue Druckkurve ergibt, die die berechneten Druckwerte an den synoptischen Stationen besser an die gemeldeten Druckwerte anpaßt. Es sind mit allen drei Berechnungsmethoden zwanzig solcher Untersuchungen vorgenommen worden, wobei das folgende Beispiel repräsentativ ist.

Beispiel: Datum 01.04. 12.00 Uhr, Abb. 29

Auf der Ordinate sind die DWD-Gitterpunkte mit den Koordinaten  $x = 14$  bis  $x = 22$  aufgetragen, und zwar für einen konstanten  $y$ -Wert ( $y = 19,44$ , das entspricht einem Querschnitt von Westnorwegen bis in den Finnischen Meerbusen, siehe Abb. 6). Ebenfalls auf der Ordinate sind sieben Stationen (Nr. 1 bis 7) markiert, deren  $y$ -Koordinatenwerte im Gitternetz  $19,44$  beträgt. Die  $x$ -Koordinate dieser Stationen ist auf der Abszisse gekennzeichnet. Auf der Ordinate ist die berechnete Differenz DIFF eingetragen, und zwar im Bereich von  $-2,0$  mb bis  $+2,0$  mb. Diese Differenz DIFF ist mit allen drei Berechnungsmethoden an den Stationen berechnet, und zwar ..... Methode I, - - - - Methode II und ——— Methode III.

In Abb. 19 ist die zu diesem Termin gehörende DWD-Analyse aufgezeichnet. Wie man aus der Abbildung 29 entnehmen kann, berechnet sich die stärkste Abweichung DIFF zwischen gemeldetem und berechneten Druck an der synoptischen Station im Bereich  $x = 15$  und  $x = 18$ . In diesem Bereich verläuft das in Abschnitt 7.1. Beispiel 2 besprochene Frontensystem.



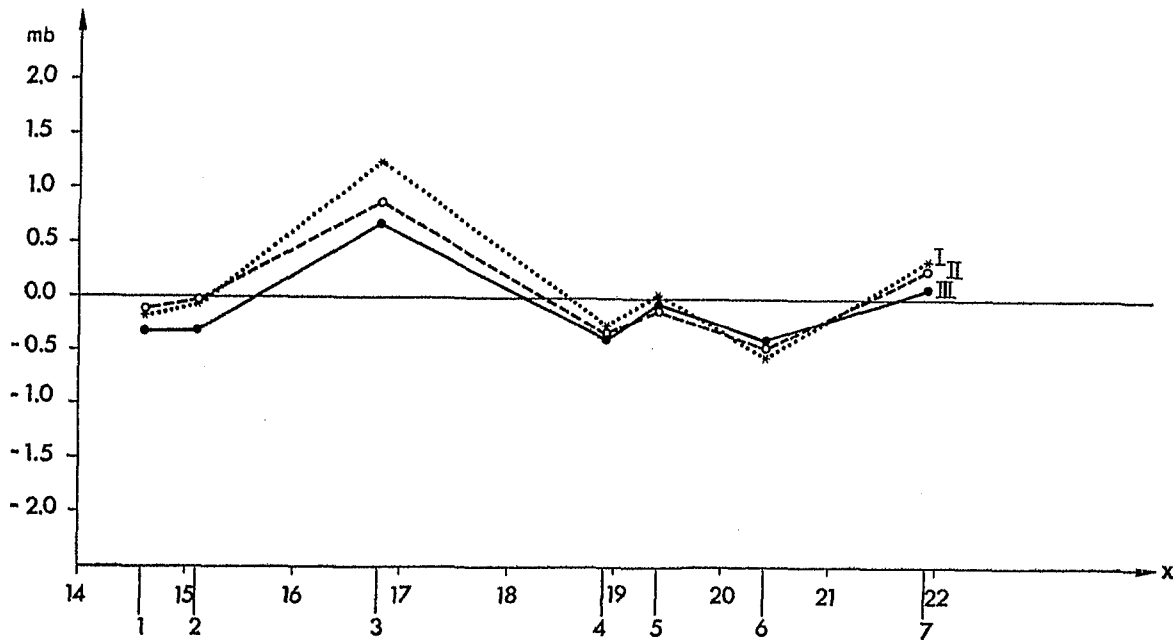


Abb. 29

Hier ergibt sich eine positive Differenz. Somit ist der Druckwert an der Station 3 um 1,24 mb zu hoch berechnet. Der tatsächlich auftretende Isobarenknick an der Front wird durch die Interpolation mit Methode I nicht berücksichtigt. Mit der Methode III wird nach der Korrektur der DWD-Gitterwerte an dieser Station ein deutlich besseres Interpolationsergebnis sichtbar. Die Differenz DIFF verringert sich auf 0,68 mb und nach Abwandlung mit der Methode II auf 0,79 mb. Das etwas schlechtere Ergebnis der Berechnung mit der Methode II liegt wohl darin begründet, daß hier eine Front mit einem scharf ausgeprägtem Isobarenknick gegeben ist und die Differenz sich mit Gleichung (16) aus 16 umliegenden DWD-Gitterwerten bestimmt, somit ein größerer Einflußbereich vor und hinter der Front gegeben ist. Bei der Berechnung der bilinearen Differenz (Methode III) werden nur vier die Station umliegende DWD-Gitterwerte herangezogen. Betrachtet man die Abweichungen DIFF an den Stationen 1 und 2, so vergrößert sich nach der Abwandlung mit der Methode III die Differenz geringfügig von -0,16 auf -0,33 mb bzw. von -0,19 mb auf

-0,32 mb. Hier ist die Anpassung durch die Abwandlung mit der Methode II eindeutig besser. An den Stationen 4, 5, 6 und 7 unterscheiden sich die berechneten Differenzen nach der Abwandlung mit den Methoden II und III nur geringfügig. Betrachtet man den gesamten Verlauf der Kurven I, II und III, so ist doch feststellbar, daß für den gesamten Schnitt entlang der Koordinate  $y = \text{constant}$  mit der Methode II eine ausgeglichene Anpassung der berechneten Druckverhältnisse an die tatsächliche Druckverteilung in weiten Gebieten erzielt werden kann. Da dieses hier aufgeführte Beispiel repräsentativ ist, wurde für die Berechnung sämtlicher Termine der Kieler Analysen das Feld der DWD-Gitterwerte mit der Methode II abgewandelt.

In der Rechenzeit unterscheiden sich die beiden Abwandlungsmethoden II und III kaum. Für einen berechneten Termin liegt die Rechenzeit je nach der Anzahl der dabei benutzten Stationen zwischen 30 sec und 45 sec. In der Tabelle II ist ersichtlich, wieviele Stationen bei den Berechnungen berücksichtigt wurden. Zu den 00.00 Uhr Terminen haben dabei bedeutend weniger Stationen synoptische Meldungen abgegeben. Es ist erkennbar, daß gerade bei zyklonalen Wetterlagen (Tabelle II, Teil 1 und 3) der mittlere quadratische Fehler  $\sigma$  und auch der Mittelwert  $\bar{\sigma}$  stark mit den Berechnungsmethoden II und III verringert werden. Weiterhin kann aus der Tabelle II entnommen werden, daß die Unterschiede zwischen den Methoden II und III selbst gering sind. Beide Fehlergrößen unterscheiden sich kaum bei den hier benutzten Abwandlungsmethoden. Im Bereich starker Zyklonen mit ausgeprägtem Isobarenknick ist die Methode III der Methode II vorzuziehen. Um jedoch eine über das gesamte Analysegebiet ausgeglichene Anpassung der abgewandelten DWD-Gitterwerte zu erhalten, ist nach den Betrachtungen zu dem oben aufgeführten Beispiel die Abwandlung mit der Berechnungsmethode II vorgezogen worden.

## 8. SCHLUSSBETRACHTUNG

Durch die Berechnung der Bodenluftdruckwerte an den DWD-Gitterpunkten mit dem in Abschnitt 3. beschriebenen Korrekturnverfahren des Deutschen Wetterdienstes ist ein gutes Ausgangsfeld für genauere und kleinräumigere Analysen im Ostseegebiet erstellt worden. Um bei einer Interpolation mit dem in Abschnitt 4.2. aufgeführten bikubischen Interpolationspolynom auf ein kleineres Gitternetz (hier das Kieler Gitter) oder auf beliebige Koordinaten im Analysengebiet (Stationskoordinaten) noch exakter den interpolierten Bodenluftdruck an das tatsächlich gemeldete Druckfeld angleichen zu können, sind die DWD-Gitterwerte in zwei unterschiedlichen Verfahren mit den Methoden II und III erfolgreich abgewandelt worden. Für diese Korrektur der DWD-Gitterwerte wurden die synoptischen Meldungen des Analysengebietes zu dem jeweiligen Analysentermin herangezogen. Beide in Abschnitt 6 beschriebenen Abwandlungsmethoden bewirken bei einer erneuten Interpolation von den nun abgewandelten DWD-Gitterwerten auf die Stationskoordinaten oder Kieler Gitterkoordinaten verbesserte Analysenergebnisse, wobei gerade in Frontgebieten deutlich besser berechnete Bodenluftdruckwerte möglich waren.

Die Beschreibung der hier aufgeführten einzelnen Beispiele stützen sich auf vielfache Ergebnisse von untersuchten Terminen während des "BALTIC 75" Unternehmens, deren gesamte Beschreibung hier nicht notwendig erscheint, da die beschriebenen Termine durchaus repräsentativ sind. Durch die Ergebnisse der erstellten Kieler Analysen aus den abgewandelten DWD-Gitterwerten kann für die unter Abschnitt 1 beschriebenen Aufgaben ein genaueres Resultat erzielt werden, wenn z.B. bei der geostrophischen Windberechnung von den Druckwerten des abgewandelten DWD-Gitters ausgegangen wird.

Für weitere Berechnungen in den noch anzufertigenden Diplomarbeiten (siehe Abschnitt 1) liegen als Resultat

dieser Arbeit die mit Methode II abgewandelten DWD-Gitterwerte zur weiteren Bearbeitung auf einem Magnetband bereit. Diese Werte können jederzeit mit einer Rechenprozedur auch auf das Kieler Gitternetz oder auf beliebige Stationskoordinaten interpoliert werden. Die dazu notwendigen Daten sind in der Anlage wiedergegeben.

## DANKSAGUNG

Die Ausgangsdaten für die Berechnungen wurden mit finanzieller Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft vom Deutschen Wetterdienst, Offenbach/Main, übernommen. Diesen beiden Organisationen gilt mein Dank, insbesondere Herrn Dr. A. Kaestner von der Forschungsabteilung des DWD, der die Modifikation des Routine-Analysenprogrammes vornahm.

## ANLAGE

Der Ausgangsdatensatz (DWD-Gitterwerte) ist in Form von eindimensionalen Feldern (integer-Art ) auf X8-Magnetbändern gespeichert. Dabei ist pro Termin ein Feld beschrieben (ein Block). Der Bodenluftdruck P in diesem Feld ist ganzzahlig in hundertstel mb angegeben. Das eindimensionale Feld A [1:1924] wurde in ein zweidimensionales Feld B [1:26, 1:37] umgerechnet, wobei vom Feld A nur jedes zweite Wort gelesen wird, da im ersten Wort keine Information enthalten ist. Das zweite Wort enthält die Druckdaten. Aus dem Feld B, welches das gesamte Analysengebiet aus Abb. 5 abdeckt, wird für die hier vorgenommenen Analysen das Feld Z [12:25, 13:27] erstellt, welches die Druckdaten an den Gitterpunkten im schwach umrandeten Gebiet in Abb. 5 enthält. Die Umrechnung von Feld A in Feld Z geschieht mit der Prozedur "UMSCHREIBEN". Das Feld Z bildet die hier benutzten DWD-Basisdaten. Nach weiteren Berechnungen wird das Feld K [12:25, 13:27] erstellt, das die abgewandelten DWD-Gitterwerte enthält. Auch hier sind die Bodenluftdruckwerte in hundertstel mb angegeben. Für sämtliche Termine sind die Felder K auf einem X1-Magnetband gespeichert. Dieses Band kann mit dem Steuerbefehl intape (N,D,C,B) eingelesen werden.

N : Magnetbandnummer

D : Datum der letzten Beschreibung (hier: 15o251)

C : Codewort mit n11s      n: Magnetbandeinheit  
                                 s: 0 Schreiben nicht erlaubt  
                                 1 Schreiben erlaubt

B : maximale Blocklänge (hier 262)

Auf diesem Band steht im Block 4000 ein integer-Feld INFO [1:10] , in dem Angaben über die Struktur des K-Feldes enthalten sind.

INF[1] : 12 Anfangskoordinate (x-Richtung) des K-Feldes  
 INF[2] : 25 Endkoordinate (x-Richtung)  
 INF[3] : 13 Anfangskoordinate (y-Richtung)  
 INF[4] : 27 Endkoordinate (y-Richtung)  
 INF[6] : 4001 Angabe des Blockes, auf dem das erste K-Feld steht  
 INF[8] : Anzahl der K-Felder auf dem Magnetband  
 INF[7, 8 und 10] sind nicht beschrieben.

Die abgewandelten DWD-Gitterwerte sind mit dem Befehl  
 frontape (O, K, Blocknummer) abrufbar (Beispiel: Für den  
 Zeitraum des "Baltic 75" Unternehmens liegen die K-Felder  
 im Abstand von 6 Stunden vor,  
 Blocknummer 4001: Datum 01.04.00.00 Uhr,  
 Blocknummer 4006: Datum 02.04.06.00 Uhr).  
 K : DWD-Feld (abgeändert).

Auf einem weiteren X8-Magnetband sind die Meldungen der hier  
 benutzten synoptischen Stationen gespeichert (Intape M,b,c,pq)

M : Magnetbandnummer

b : BPI (hier 556)

c : y oo oos (s = 1: Schreiben erlaubt)

y = Unitnummer

pq: Kanalnummer.

Pro Analysentermin sind dabei zwei Blöcke zu berücksichtigen.  
 Die Blockzählung beginnt auf diesem Magnetband bei 0, so daß  
 für den Termin 01.04.75.00 Uhr die Blöcke 0 und 1 die benutzten  
 synoptischen Daten enthalten. Pro Block sind dabei maximal  
 200 Stationen berücksichtigt, wobei deren Informationen in  
 dem Feld T[-4:7,0:200] festgehalten sind. Dieses Feld T liegt  
 in folgender Form (integer array) vor:

	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
0	YYMM DDHH											
1	x	y	s	L	PH	P	dd	ff	TT	T <sub>d</sub>	U	U
.												
.												
K												

Dabei sind folgende Inhalte gegeben:

x : kartes. Koordinatenangabe der Station im benutzt.Gitternetz  
y : y-Koordinatenangabe  
s : Stationskennziffer  
L : Lambda-Koordinate der stereographischen Projektion  
PH : Phi-Koordinate der stereographischen Projektion  
P : Bodenluftdruck der synoptischen Station (1/10 mb)  
dd : Windrichtung  
ff : Windstärke kn  
TT : aktuelle Temperatur zum Meldungstermin °C  
T<sub>d</sub> : Taupunktstemperatur °C  
U : Unsicherheitskennungen  
K : Laufindex der Zeilen

Sind in einem Block nicht sämtliche 200 Zeilen mit synoptischen Stationen ausgefüllt, so ist der Feldplatz  $T[-4,K] : = 777777$  gesetzt.



## LITERATURVERZEICHNIS

- BERGTHORSON, P. and B. DOÖS, Numerical weather map analysis,  
Tellus Vol. 7, No. 3 (1955)
- BELOUSOV, S.L., L.S. GANDIN and S.A. MASHKOVICH, Computer  
processing of meteorological data,  
Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo  
Leningrad 1968,  
Trans: Israel Program for Scientific  
Translations, Jerusalem 1971
- CRESSMANN, G.P., An operational objective analysis system,  
Month. Weath. Rev., Vol. 87, No. 10, 1959
- GANDIN, L.S., Objektive analysis of meteorological fields,  
Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo,  
Leningrad 1963,  
Trans: Israel Program for Scientific  
Translations, Jerusalem 1965
- GILCHRIST, B. and G.P. CRESSMANN, An experiment in objective  
analysis, Tellus Vol. 6, No. 4, 1954
- KAESTNER, A., Über die Weiterentwicklung des im DWD benutzten  
Programms zur numerischen Analyse von  
Wetterkarten, Meteorologische Rundschau  
24. Jahrgang, Heft 5, 1971
- MOLLWO, H., Grundlage der Wettervorhersage, Leitfäden für die  
Ausbildung im Deutschen Wetterdienst  
Nr. 2, Offenbach, 1964
- PETROV, A.A., An objective analysis based on the approximation of  
fields by polynoms, Trans: R.F. Zobel from  
Leningrad GlavUprav.Gidromet. Sluz,  
Met.Gidr., 1968, No. 6, pp 21-28
- YANAI, M., An experimental objectiv analysis in the Tropics,  
Technical paper No. 62, Department of  
Atmosph. Science, Colorado State  
University, 1964